

UNIVERSITÄT ROSTOCK

Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik

Dissertation

Implementierung struktureller Topologie- optimierung in das schiffbauliche Konstruktionsumfeld

Vorgelegt von: Ralf Tschullik
Geboren am: 14. Juni 1975
In: Rostock

Zum
Erlangen des akademischen Grades

**Doktoringenieur
(Dr.-Ing.)**

Erstgutachter: Prof. Dr.Eng./Hiroshima Univ. Patrick Kaeding,
Fak. für Maschinenbau und Schiffstechnik, Universität Rostock
Zweitgutachter: Prof. Dr.-Ing. Gerhard Scharr,
Fak. für Maschinenbau und Schiffstechnik, Universität Rostock
Datum der Einreichung: 26.03.15
Datum der Verteidigung: 10.07.15

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit am Lehrstuhl für Schiffstechnische Konstruktionen der Universität Rostock.

Mein herzlicher Dank gilt dem Leiter des Lehrstuhls, Herr Prof. Patrick Kaeding, sowie dem ehemaligen Lehrstuhlinhaber Herr Prof. P. Pentschew. Vor allem die Anregungen und Hinweise in Fachgesprächen der letzten Jahre waren eine wesentliche Stütze für das Gelingen einer solchen wissenschaftlichen Arbeit.

Herrn Prof. Scharr möchte ich für die Übernahme des Korreferats danken.

Allen Kollegen, Mitarbeitern und ehemaligen Mitarbeitern des Lehrstuhls, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben, möchte ich ebenfalls meinen Dank aussprechen. Darüber hinaus ist auch der Anteil der durch Diplomanden, Semestranden und studentische Hilfskräfte erbracht wurde, nicht zu vergessen.

Weiterhin gilt mein Dank den Mitarbeitern der Forschungs- und Entwicklungsabteilung der Flensburger Schiffbau-Gesellschaft mbH, insbesondere Herr K. Werner, für das entgegengebrachte Interesse zu diesem Thema und die fortwährende Unterstützung.

Schließlich möchte ich meiner Familie bedanken. Sie waren stets wichtiger Rückhalt.

„Phantasie ist wichtiger als Wissen, denn Wissen ist begrenzt.“

Albert Einstein (1879-1955)

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die eingereichte Dissertation zum Thema

„Implementierung struktureller Topologieoptimierung in das schiffbauliche Konstruktionsumfeld“

selbstständig nach bestem Wissen und mit den vorliegenden Informationen verfasst habe.

Alle Quellen und Hilfsmittel sind ordnungsgemäß angegeben.

Rostock im März 2015

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Ralf Tschullik', with a stylized flourish at the end.

Unterschrift

Copyright © 2015 , Ralf Tschullik

Alle Rechte vorbehalten, Text, Bilder und Grafiken sind geschütztes Material.

email: ralf.tschullik@uni-rostock.de

Universität Rostock

Albert-Einstein-Straße 2

D-18059 Rostock

Tel: + 49 381 498 9295

Fax: + 49 381 498 9522

email: ralf.tschullik@uni-rostock.de

Kurzfassung

Schiffbau ist immer auch globaler Wettbewerb, daher müssen in Deutschland Ingenieurskunst und Innovationen in allen Bereichen des Entstehungsprozesses weiter in den Vordergrund rücken. Die Dissertation fokussiert dabei den Entwicklungsbereich der Stahlschiffsstruktur.

Mit dem Blick auf andere Industrien, wie beispielsweise die der Luft- und Raumfahrtstechnik oder die des Automobilbaus, zeigt sich, dass gerade die Anwendung der verschiedenen strukturoptimierenden Verfahren Wettbewerbsvorteile bringen und Innovationen fördern kann. So hat sich auch die Topologieoptimierung als ein wichtiger Vertreter dieser Verfahren in der täglichen Praxis durchgesetzt.

Auch im Schiffbau wird natürlich vielfältig Strukturoptimierung betrieben. Für das Teilgebiet der Topologieoptimierung gilt das aber nicht, wenngleich es hier einzelne Ansätze gegeben hat.

Das Hauptziel der Dissertation ist es zu untersuchen, inwieweit zielgerichtete Strukturverbesserungen mittels Topologieoptimierung für den Schiffbau anwendbar sind. Diesbezüglich sind im Folgenden Methoden und Verfahren entwickelt worden, die eine Implementierung ermöglichen. Dabei wird zunächst klar, dass die Ergebnisse nicht sofort und vor allem nicht ohne Weiteres übernommen werden können. Aufgrund der Besonderheiten bei der schiffbaulichen Bauweise und dem Produktentwicklungsprozess müssen die Ergebnisse der Topologieoptimierung als Konstruktionsrichtlinie in Form eines Kraftpfadmanagements angesehen werden.

Um die Vielfalt der entwickelten Algorithmen und Verfahren für den Schiffbau anwendbar zu machen, bedarf es vorab einer detaillierten Analyse der Grundlagen. Kapitel zwei bis vier dieser Arbeit befassen sich daher eingehend mit dem Stand der Forschung und Entwicklung sowie der Theorie der mechanischen Strukturoptimierung respektive Topologieoptimierung. Mit der Analyse und Auswahl geeigneter Konzepte werden in Kapitel fünf dann Grundlagen für eine Implementierung gelegt.

Während bei der Stahlschiffdimensionierung zeitlich von groben globalen Modellen zu den fein aufgelösten Detailmodellen analysiert wird, ist das Vorgehen in dieser Dissertation dem entgegengesetzt (rekursiv). Daraus ergibt sich eine erste Anwendung der Topologieoptimierung zum fortgeschrittenen Zeitpunkt mit zwar wenig Änderungspotential, dafür aber einem hohen Kenntnisstand. Dies ermöglicht zweidimensionale Modelle schiffbaulicher Applikationen, die direkt auf eigene Programmierungen der Topologieoptimierung angewendet wurden. So konnte bereits an dieser Stelle einerseits der Beweis der Überführbarkeit angetreten werden, andererseits dienen gerade eigene Programmierungen dem besseren Verständnis der theoretischen Grundlagen.

Kapitel sechs widmet sich der praktischen Implementierung in die gewohnte Konstruktionsumgebung durch stufenweises Vorgehen nach dem rekursiven Ansatz. Eine erste Stufe ist dabei der Einsatz in der Phase der Detailkonstruktion. Mit der Modellierung auf Subsystemlevel wird beispielhaft das Bauteil Bodenwange einer Topologieoptimierung unterzogen. Für das Ziel der Massereduktion wird ein erhebliches Potential nachgewiesen.

Mit dem Ziel der durchgängigen Unterstützung des Entstehungsprozesses kann in einer folgenden Stufe eine Implementierung ab der frühen Konzeptphase erfolgen. Am Beispiel der Großsektion Vorschiff wird dies mit dem Ziel der Steifigkeitserhöhung entwickelt und untersucht. Bedingt durch das frühe Entwicklungsstadium, sind die Ergebnisse der Topologieoptimierung an dieser Stelle anders zu bewerten. Die Konstruktion besitzt noch ein hohes Maß an Freiheitsgraden. Die Dissertation greift diesen Umstand auf. Für die gezielte Verbesserung der Stahlschiffsstruktur des Vorschiffes werden daher Vorschläge erarbeitet. Neben einer fertigungsnahen Lösung mit den üblichen Mitteln deutscher Werften ist perspektivisch aber auch eine zweite, stärker am Leichtbau orientierte Lösung, basierend auf mechanischen Zugträgern, vorstellbar. So könnten diese ähnlich wie Laschsysteme in der Schiffskonstruktion zum Einsatz kommen.

Im Rahmen einer abschließenden Validierung werden alle entwickelten Designvorschläge in Kapitel sieben strukturell untersucht. Letztlich zeigt der Vergleich der Festigkeitsniveaus in allen Fällen die erhoffte Strukturverbesserung. Der Implementierung der Topologieoptimierung kann für schiffstechnische Konstruktionen damit erhebliches Potential zur Verbesserung des Entwicklungsprozesses bescheinigt werden.

Abstract

Nowadays topology optimization is widely used in different industries. In the shipbuilding industry there are sporadic approaches as well. This dissertation deals with that phenomenon. It is the main topic to improve the use of topology optimization in all design phases regarding ship structures.

A deterministic approach for such an implementation, starting from the detail design up to a topology optimization inclusion in the driven design process, is used in this dissertation.

After analyzing different examples from other industries in chapter two and three, the theoretical background of topology optimization is focused in chapter four. Due to the specific characteristics in the ship design process a direct transfer of the use from other industries is not possible.

The basis for implementation is given in chapter five. Looking to EVAN's design spiral, ship structures became more and more complex on the timeline. In this dissertation a recursive (ARISTOTELES synthetic like) approach is used. So, at first isolated 2D ship

structures have to be analyzed. For this, matlab based toolboxes are developed, directly interacting with the theoretical findings.

The analysis of the possibilities for the practical implementation in the ship design process is focused in chapter six. The first example is a 3D floor plate structure at the detail design phase. The second example analyses the next implementation step. That means the methods of topology optimization were directly included as a driven design process. The used example is a bow structure with the design objective to improve the global structural stiffness. Because of the shipbuilding design specifics it is not possible to transfer the topology optimization results directly. The determined 3D load management shall work as a design proposal tool as well as to find the optimal design right first time.

While analyzing the practical implementation, a typical drawback has been discovered. On the one hand side special shipbuilding like software packages are not available at the moment and on the other hand side there are still gaps with respect to universal interfaces. Another important bottle neck for direct and especially practical application at yards is the load sensitivity of the design proposal. In the future there is the need to get more exact load information at a very early design stage.

As part of a validation, all developed design proposals (floor plate, bow structure) are structurally investigated in chapter seven. Finally, the comparison of the strength levels in all cases verifies the expected structural improvement. As a summary it can be said that there is a real chance to include topology optimization. This dissertation gives the way for practical implementation of topology optimization focusing the shipbuilding process up to a driven design process.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
1.1	Motivation.....	1
1.2	Ziele der Arbeit.....	3
1.2.1	Entwicklungszeit.....	5
1.2.2	Produktqualität.....	6
1.2.3	Anwendung.....	7
1.3	Gliederung der Arbeit.....	7
2	Konzept mechanischer Strukturoptimierung.....	8
2.1	Allgemeine Problemformulierung.....	8
2.2	Typen der Strukturoptimierung.....	9
2.3	Eingliederung der Optimierung in den Schiffbaudesignprozess.....	10
2.3.1	Topologieoptimierung.....	10
2.3.2	Modellbildung des globalen Optimierungsproblems.....	11
2.3.3	Entwurfsziele bei Anwendung der Topologieoptimierung.....	12
3	Stand der Forschung und Entwicklung.....	13
3.1	Entwicklung und Trends der Strukturoptimierung.....	13
3.2	Strukturoptimierung in der industriellen Praxis.....	15
3.2.1	Automobil- und allgemeiner Maschinenbau.....	15
3.2.2	Luft- und Raumfahrttechnik.....	16
3.2.3	Stand der Anwendung im Schiffbau.....	17
4	Theorie mechanischer Strukturoptimierung.....	23
4.1	Vorbetrachtungen.....	23
4.2	Simulationsmodell – Finite Elemente (Struktur)analyse.....	23
4.2.1	Grundlagen.....	24
4.2.2	Das Scheibenproblem.....	25
	Gebietszerlegung.....	27
	Verschiebungsfeldlösung, Elementsteifigkeit und rechte Seite	28
	Diskretisierung und Primärlösung.....	29
	Nachlaufrechnung.....	31
4.2.3	Zusammenfassender Ablauf der Berechnung.....	32

4.3 Optimierungsmodell.....	33
4.3.1 Modell der materiellen Topologieoptimierung.....	33
Parametrisierung in der Topologieoptimierung.....	34
Zielfunktion und Nebenbedingung der Topologieoptimierung.....	37
Numerische Probleme.....	40
4.4 Optimierungsalgorithmus.....	41
4.4.1 Optimalitätskriterienverfahren.....	42
4.4.2 Methoden der mathematischen Programmierung.....	44
4.4.3 Numerischer Lösungserzeuger - Optimierungsterminologie.....	47
Optimierung ohne Restriktionen.....	47
Optimierung mit Restriktionen.....	48
Verknüpfung von Gradienten basierter Optimierung mit der FEM.....	50
4.4.4 Optimierungsalgorithmen der Topologieoptimierung.....	52
Die Methode der bewegten Asymptoten.....	53
CAO-Verfahren nach Mattheck.....	54
5 Verfahrensentwurf - Programmierumsetzung.....	56
5.1 Numerische Programmier- und Simulationsumgebung.....	57
5.2 Beispielhafte Umsetzung - Bodenwrange 2D.....	58
5.2.1 Initialisierung – Entwurfsmodell.....	59
5.2.2 Analysemodell Bodenwrange 2D.....	61
5.2.3 Optimierungsmodell Bodenwrange 2D.....	64
5.3 Beispielhafte Umsetzung - Bionische Formoptimierung bei Knieblechen.....	67
5.3.1 Systembeschreibung und Entwurfsmodell.....	68
5.3.2 Praktische Umsetzung.....	68
Analysemodell – FEM-Slave.....	70
Optimierungsmodell	72
Ergebnisdiskussion 2D Formoptimierung.....	72
6 Stufen schiffbaulicher Implementierung.....	75
6.1 Topologieoptimierung im Detail Design am Beispiel Bodenwrange 3D.....	75
6.1.1 Schiffbaulich funktionale Bauteileinordnung der Bodenwrange.....	77
6.1.2 Bauraum und Simulationsmodell Doppelboden.....	78
6.1.3 Optimierungsmodell und -ergebnisse.....	85

6.1.4 Designvorschlag und Konstruktionsüberführung.....	91
6.2 Topologieoptimierung als Konzeptdesign am Beispiel des Vorschiffbereichs.....	95
6.2.1 Geometrie des Vorschiffs und funktionale Beschreibung.....	96
6.2.2 Bauraum und Simulationsmodell Vorschiff.....	97
6.2.3 Optimierungsmodell und -ergebnisse für das Vorschiff	107
6.2.4 Designvorschlag und Ergebnisüberführung.....	116
7 Aspekte der Validierung.....	121
7.1 Strukturanalyse Bodenwrange.....	121
7.1.1 Modell und Ergebnisse der konventionellen Bauart.....	121
7.1.2 Festigkeitsniveau des optimierten Bauteils.....	123
7.2 Strukturanalyse Vorschiffbereich ConRo-Schiff.....	125
7.2.1 Modellgenerierung.....	125
7.2.2 Ergebnisdiskussion der konventionellen Bauart.....	129
7.2.3 Ergebnisdiskussion für das optimierte Vorschiff.....	133
8 Zusammenfassung und Ausblick.....	135
Literatur.....	138

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Auftragsvolumen deutscher Werften nach VSM[141].....	1
Abbildung 1.2: Beispiele von Industrieanwendungen der Topologieoptimierung.....	4
Abbildung 1.3: Dilemma der Konstruktion nach [136].....	5
Abbildung 1.4: Entwurfsspirale, angelehnt an [36].....	6
Abbildung 2.1: Arten der Strukturoptimierung nach [118].....	10
Abbildung 2.2: Maschinenträgeroptimierung einer Windkraftanlage [45].....	11
Abbildung 2.3: Drei-Säulen-Konzept der simulationsgebundenen Strukturoptimierung....	12
Abbildung 3.1: Querschnittsoptimierung eines Kragbalken nach Galilei [75].....	14
Abbildung 3.2: Topologieoptimierung Motorträger, Ziel Gewichtsreduktion; Copyright © Scania AG Schweden [112].....	16
Abbildung 3.3: Topologieoptimierung Getriebeboxhaus, Ziel Gewichtsreduktion; Copyright © ZF Friedrichshafen AG [28].....	17
Abbildung 3.4: Topologieoptimierung des Querspantes eines A380 mit Fertigungsaussicht [4].....	18
Abbildung 3.5: Entwicklungsvergleich technischer Produkte angelehnt an [76].....	19
Abbildung 3.6: Beispiele von Strukturoptimierungen im Großschiffbau.....	23
Abbildung 4.1: Schleife der Optimierungsprozedur.....	24
Abbildung 4.2: Schema zur Modellierung als iterativer Prozess.....	25
Abbildung 4.3: Aufteilung eines Körpers mit Dreieckselementen (T3 bzw. CST) als Referenzelement.....	29
Abbildung 4.4: Natürliche Koordinaten und Formfunktion am Punkt 2 für das CST-Element.....	31
Abbildung 4.5: Ablaufschema für die finite Elemente Analyse.....	34
Abbildung 4.6: Beispiel einer Mikrostruktur mit Basiszellen.....	36
Abbildung 4.7: Einfluss des Bestrafungsexponenten auf die Elementsteifigkeit in Abhängigkeit der Dichte.....	38
Abbildung 4.8: Beispiel für die Ausbildung von Schachbrettmustern.....	41
Abbildung 4.9: Überblick der Optimierungsalgorithmen nach [9].....	43
Abbildung 4.10: Routine der Strukturoptimierung mit Optimalitätskriterienverfahren.....	44
Abbildung 4.11: Strukturoptimierungsroutine der mathematischen Programmierung.....	46
Abbildung 4.12: Baumbeobachtungen zum Verhältnis Jahresringausbildung und Belastungsrichtung.....	55
Abbildung 5.1: Struktogramm der zeitlichen Eingliederung der Topologieoptimierung in den Schiffsdesignprozess.....	57

Abbildung 5.2: Schema Matlab-Programmierung – Säulenmodell.....	60
Abbildung 5.3: Bereinigtes 2D-Entwurfsmodell der Bodenwrange.....	60
Abbildung 5.4: Schema für Berechnungsablauf mit der FEA.....	63
Abbildung 5.5: Darstellung der (approximierten) Verschiebungen mit FEMSkript.m für 2D Bodenwrange mit 100mm Q4 Elementen.....	65
Abbildung 5.6: Ablaufschema Gesamtablauf der Topologieoptimierung in der Topopti-Toolbox.....	66
Abbildung 5.7: Oben - Ergebnis für Q4 Elemente und 50% Volumenreduktion, Unten - Ergebnis für T3 Elemente bei 40% Volumenreduktion.....	68
Abbildung 5.8: Beispiele für Knieblechbauarten [29].....	68
Abbildung 5.9: Entwurfsmodell für die Optimierung des Knieblechs.....	69
Abbildung 5.10: Ablaufschema Workbenchkonzept Toolbox.....	70
Abbildung 5.11: Visualisierung der Einschnüreffekte an der Oberfläche nach [58].....	71
Abbildung 5.12: Analysemodell und Startgeometrie für die Knieblechoptimierung.....	72
Abbildung 5.13: Schema des Optimierungsmodells mit Kniekonturpunkten.....	73
Abbildung 5.14: Vergleich der Konturen Start und Ergebnis für Modelle 1 und 3.....	74
Abbildung 5.15: Iterationsverlauf der Spannungsdifferenzen der Knieblechoptimierung für die Modelle 1 (schwarz) und 3 (blau).....	74
Abbildung 6.1: Seitenriss VWS Safmarine.....	77
Abbildung 6.2: Markierung Spant 85 bis 93 im Seitenriss.....	79
Abbildung 6.3: Anordnung der Segmentierung und Raster der HP-Profile.....	80
Abbildung 6.4: Geometriegrundlage für Bauraum und Simulationsmodell der Doppelbodensektion.....	81
Abbildung 6.5: Geometrierandbedingungen im Simulationsmodell.....	83
Abbildung 6.6: Lage der Containerfußpunkte.....	84
Abbildung 6.7: Arbeitsäquivalente Knotenkräfte aus Containerauflast.....	85
Abbildung 6.8: Bauraummodelle der Bodenwrange 93	86
Abbildung 6.9: Dichteverteilung Bodenwrange 3D.....	89
Abbildung 6.10: Dichteverteilung Bodenwrange 3D mit Elementausblendung.....	89
Abbildung 6.11: Dichteverteilung Bodenwrange 3D Modell 2.....	92
Abbildung 6.12: Dichteverteilung Bodenwrange 3D Modell 2 mit Elementausblendung.	92
Abbildung 6.13: Konstruktionsvorschlag Bodenwrange 3D Modell 1.....	92
Abbildung 6.14: Konstruktionsvorschlag 1 Bodenwrange 3D Modell 2.....	93
Abbildung 6.15: Konstruktionsvorschlag 2 Bodenwrange 3D Modell 2.....	94
Abbildung 6.16: Vergleich der Anordnung Beulsteifen für Modell 2 und Original.....	94
Abbildung 6.17: Beispiele für Strukturschäden im Vorschiff.....	96

Abbildung 6.18: Strukturbauteile des Vorschiffes Typ ConRo.....	98
Abbildung 6.19: Seitenansicht ConRo-Fähre incl. Hervorhebung des untersuchten Bereiches.....	100
Abbildung 6.20: Gegenüberstellung der Bauraummodelle Kategorie I.....	101
Abbildung 6.21: Skizze der geometrischen Randbedingungen des Vorschiffs.....	104
Abbildung 6.22: Vergleichsskizze der Seegangsnormalbelastung und Slamming.....	104
Abbildung 6.23: Belastungsplot ortsgebunden über die Eintauchzeit am Vorschiff nach [18].....	105
Abbildung 6.24: Qualitativer Belastungsverlauf für Eintauchvorgang nach CFD-Rechnung, von links Intervallanfang bis rechts Intervallende nach 3 Sekunden (Skalennormiert auf 100 kN/m ²).....	106
Abbildung 6.25: Optimierungsergebnisvergleich, links Hüllmodell für die Poseidonlasten, Mitte zusätzlich inkl. Seitenschlaglasten von seitlicher See und rechts inkl. aller denkbarer Seitenschlageinfallwinkel	110
Abbildung 6.26: Grafischer Iterationsverlauf für die Zielfunktion von Modell 1-G-1234-56789.....	111
Abbildung 6.27: Iso-Voll und -Schnittansicht der Dichteverteilung sowie Hervorhebung der Ergebnispunkte für Modell 1-G-1234-56789.....	112
Abbildung 6.28: Iso-Vollansicht der Dichteverteilung für Modell 1-K-1234-56789.....	115
Abbildung 6.29: Iso-Voll- und Schnittansicht der Dichteverteilung für Modell 2-G-1234-56789.....	116
Abbildung 6.30: Darstellung der wichtigen Ergebnispunkte für die Konstruktionsanpassung Modell II.....	118
Abbildung 6.31: Konstruktionsvorschlag Optimierungsmodell für Position 2.....	118
Abbildung 6.32: Konstruktionsvorschlag Optimierungsmodell für Position 4.....	119
Abbildung 6.33: Konstruktionsvorschlag Optimierungsmodell für Position 6.....	120
Abbildung 7.1: Vergleichsspannung BW 93 Ausgangsmodell (Netztyp nur Schalen).....	122
Abbildung 7.2: Spant-Anbindung an Bodenwrange 93.....	123
Abbildung 7.3: Vergleichsspannung BW 93 Topologieoptimierungsmodell 1 (incl. Anbindungen).....	124
Abbildung 7.4: Vergleichsspannung BW 93 Topologieoptimierungsmodell 2 (incl. Anbindungen).....	124
Abbildung 7.5: Ortsdefinition für numerischen Spannungsvergleich bei BW 93.....	125
Abbildung 7.6: ISO-Ansicht (aus Poseidon) funktionaler Aufteilung des VS, oben links komplett, oben rechts HP-Profil, unten links Querverbände, unten rechts Längsverbände.....	127

Abbildung 7.7: Schema zum Ansatz direkter Generierung eines FE-Modells aus der Schiffbauumgebung.....	128
Abbildung 7.8: Plot der Vergleichsspannung untersuchter Baugruppen für Lastfall 8 in der Übersicht.....	132
Abbildung 7.9: Vergleichsspannung LF 4 des Details Stringerdeck, oben konventionelle und unten Neukonstruktion	134
Abbildung 7.10: Vergleichsspannung des Details Rahmenverstärkung für LF 3 an Position 4.....	134
Abbildung 7.11: Vergleichsspannung für LF 8 von Ankertaschendetails an Position 6....	135
Abbildung 8.1: Veranschaulichung der Zugseilwirkung.....	138
Abbildung A.1: Konvergenzverhalten der vertikalen Verschiebung für den Kragträger...	153
Abbildung A.2: Geometrie, Parameter und Vernetzung des MBB-Balkenproblems.....	154
Abbildung A.3: Konvergenzverhalten der vertikalen Verschiebung für den Biegebalken	155
Abbildung B.1: Schema der beteiligten Softwarepakete und Interaktion bis zum Simulationsmodell des Vorschiffs.....	156

Symbole und Abkürzungen

Symbole

$\delta(\cdot)$	Variation
(\cdot)	kontinuierliche Größen
$d(\cdot)$	infinitesimale Größen
$(\cdot)^h$	Näherungsfunktion
$\Delta(\cdot)$	inkrementelle Größen
$(\cdot)^*$	Lösungspunkt des Optimierungsproblems
$(\cdot)_k$	Index zur Bestimmung des Optimierungsfortschrittes
$(\hat{\cdot})$	Größen bei Verschiebungsvorgabe
$(\check{\cdot})$	Größen bei Verschiebungsvorgabe
$(\cdot)^{eff}$	Index zur Kennzeichnung des effektiven Wertes
$(\cdot)_e$	Index finite Elemente
n_e	Anzahl der (finiten) Elemente
$(\tilde{\cdot})$	Kennzeichnung für ein Ersatzproblem

Operatoren

$\nabla_s(\cdot)$	Ableitung nach den Entwurfsvariablen
$\nabla_u(\cdot)$	Ableitung nach den Verschiebungsgrößen

∇	Gradient des Verschiebungsfeldes
----------	----------------------------------

H	HESSE Matrix
-----	--------------

Δ	LAPLACE-Operator
----------	------------------

L	Differentialoperator
-----	----------------------

Optimierungsgrößen

L	LAGRANGE Funktion
-----	-------------------

f	Zielfunktion
-----	--------------

\tilde{f}	modifizierte (bzw. Pseudo-) Zielfunktion, adjungierte Sensitivitätsanalyse
-------------	--

h	Vektor der Gleichheitsnebenbedingungen
-----	--

g	Vektor der Ungleichheitsnebenbedingungen
-----	--

α^*	Suchschrittweite
------------	------------------

η	LAGRANGE- Multiplikatoren für die Gleichheitsnebenbedingungen
--------	---

γ	LAGRANGE- Multiplikatoren für die Ungleichheitsnebenbedingungen
----------	---

$I_{(\cdot)}$	Index zur Bestimmung des Optimierungsfortschrittes
---------------	--

p^k	Suchrichtung
-------	--------------

s	eine diskrete Entwurfsvariable
-----	--------------------------------

s	Vektor der diskreten Entwurfsvariablen (Optimierungsmodell)
s_L	Vektor der unteren Restriktion der Entwurfsvariablen
s_U	Vektor der oberen Restriktion der Entwurfsvariablen
n_f	Anzahl der Zielfunktion
n_s	Anzahl der Optimierungsvariablen
n_h	Anzahl der Gleichheitsnebenbedingungen
n_g	Anzahl der Ungleichheitsnebenbedingungen
k	Optimierungsschritt

Geometriebeschreibung

X	Ortsvektor eines materiellen Punktes in der Referenzkonfiguration
x	Ortsvektor eines materiellen Punktes in der Momentankonfiguration (Analyse- bzw. Simulationsmodell)
J	JAKOBI-Matrix
$ J $	JAKOBI-Determinante
Ω	Entwurfsraum auch Designraum bzw. Konstruktionsraum bzw. Bauraum der Gesamtstruktur
Ω^{Mat}	Vorgabe für die reduzierte Materialmenge im Konstruktionsraum
Γ_D	DIRICHLET Randbedingungen vor allem Lager etc.

Γ_N	NEUMANN Randbedingungen wie äußere Belastungen etc.
------------	---

Werkstoff, Material

C	Stoffmatrix
ϵ	Verzerrungsmatrix
λ	LAMÉ-Konstante
μ	LAMÉ-Konstante
n	Materialparameter zur Beschreibung der Nichtlinearität
E	Elastizitätsmodul
E_0	Elastizitätsmodul des Referenzmaterials
ν	POISSON-Zahl, Querdehnzahl
ρ_i	Dichte, Porosität des i-ten Elements
ρ_0	Referenzdichte (des ausgefüllten Elements)
p	Strafexponent (Penalty Faktor) für den SIMP-Ansatz
ε	Dehnung
v_i	Volumen des i-ten finiten Elements

Spannungen, Belastungen, Kinematik

σ	CAUCHY-Spannungstensor
----------	------------------------

\mathbf{S}	2.PIOLA-KIRCHHOFF-Spannungstensor bzw. -matrix
σ_v	v.MISES-Spannungen
\mathbf{u}	Verschiebungsfeld
\mathbf{d}	Vektor der approximierten Dehnungen
\mathbf{E}	GREEN-LAGRANGE-Verzerrungsmatrix
\mathbf{F}	AIRYSche Spannungsfunktion
\mathbf{B}	Dehnungsmatrix
N	Formfunktion
\mathbf{K}	Steifigkeitsmatrix

Arbeits- und Energieausdrücke

Π_{ges}	Gesamtpotential
$\Pi_i ; \Pi_a$	Potential der inneren und äußeren Kräfte
W	Arbeit
W^{int}	innere Arbeit
W^{ext}	externe Arbeit
δW	virtuelle Arbeit
δW^{int}	virtuelle innere Arbeit

δW^{ext}

virtuelle externe Arbeit

Sonstige Größen

$u(x,y)$ Interpolationsfunktion der Verschiebung

α Wachstumskorrekturfaktor

Abkürzungen

ASCII American Standard Code for Information Interchange

CAD Computer Aided Design

CAO Computer Aided Optimization

CFD Computational Fluid Dynamics

CST Constant Strain Triangle (lineares Dreieckselement)

FEM
Finite Elemente Methode

FO
Formoptimierung

FSG Flensburger Schiffbau-Gesellschaft mbH & Co.KG

FSD Fully Stressed Design

FVK Faserverstärkte Kunststoffe

KKT KARUSH-KUHN-TUCKER-Bedingung

LF Lastfall

MFD	Method of Feasible Directions
MMA	Method of Moving Asymptotes
MP	Mathematische Programmierung
NB	Nebenbedingung
OC	Optimalitätskriterienverfahren
Q4	Bilineares 4-Knoten-Element
PS	Port Side
PvA	Prinzip der virtuellen Arbeit
PvV	Prinzip der virtuellen Verschiebung
SB	Starboard Side
SCP	Sequentielle Konvexe Programmierung
SIMP	Solid Isotropic Microstructure with Penalty for intermediate density
SKO	Soft Kill Option
SLP	Sequentielle Lineare Programmierung
SQP	Sequentielle Quadratische Programmierung
T3	Lineares Dreieckselement

1 Einleitung

1.1 Motivation

Der deutsche bzw. europäische Schiffbau befindet sich nach wie vor in einer starken Umbruchphase. Der Wandel der Weltwirtschaft mit der immer stärkeren Verlagerung der Produktion nach Asien ist dem Schiffbau schon länger bekannt. Dennoch, durch den unbedingten Willen Chinas zur Vormachtstellung im Schiffbau einerseits sowie die seit 2009 andauernde Wirtschafts- und Finanzkrise andererseits wird dieser nötige Prozess für die hiesige maritime Industrie noch einmal katalysiert.

So bestätigen die jährlichen Analysen des deutschen Verbandes für Schiffbau und Meerestechnik e.V. (VSM) dieses eindeutig [140], [141]. In der Entwicklung des deutschen Seeschiffbaus von 2007 bis 2013, vgl. Abbildung 1.1, ist in allen Faktoren ein negativer Verlauf abzulesen. Indes sinken Ablieferungen, Auftragseingänge und Auftragsbestände im benannten Zeitraum nach zeitweisen Einbrüchen bis zu 50 Prozent mittlerweile nicht mehr so stark.

ABLIEFERUNGEN | COMPLETIONS

	2009	2010	2011	2012	2013
Anzahl Number	54	49	31	26	20
GT (1.000)	767	957	406	450	355
CGT (1.000)	733	975	442	519	403
Mio. € MILL. €	2.618	4.657	1.989	2.665	2.051

AUFTRAGSEINGÄNGE | NEW ORDERS

	2009	2010	2011	2012	2013
Anzahl Number	20	24	28	18	14
GT (1.000)	43	629	472	445	374
CGT (1.000)	68	653	531	495	399
Mio. € MILL. €	475	2.719	3.033	3.175	2.608

AUFTRAGSBESTÄNDE | ORDER BOOK

	2009	2010	2011	2012	2013
Anzahl Number	106	74	71	55	49
GT (1.000)	1.870	1.416	1.479	1.407	1.451
CGT (1.000)	1.933	1.538	1.625	1.527	1.542
Mio. € MILL. €	9.644	7.356	8.407	8.513	9.097

Abbildung 1.1: Auftragsvolumen deutscher Werften nach VSM[141]

Was aber auch in den absoluten Zahlen ablesbar ist, ist dass die deutsche Schiffbauindustrie (trotz gravierender internationaler Wettbewerbsverzerrungen) nach wie vor eine Schlüssel-industrie für den hiesigen Wirtschaftsstandort darstellt.

Die Entwicklung für die kommenden Jahre sind, bedingt durch die Abhängigkeit vieler

Faktoren und die komplexen Zusammenhänge, natürlich nicht eindeutig vorhersagbar. Dennoch sind die Hinweise ernst zu nehmen, dass eine Umkehr der Abwärtsentwicklungen noch nicht abzusehen ist. Die betroffenen Industrieunternehmen fokussieren sich daher weiter auf den so genannten Spezialschiffbau. Unter diesem Sammelbegriff verbergen sich nahezu alle Nicht-Containerschiffe – vom Kreuzfahrtschiff bis zur Megayacht, von der Frachtfähre bis zum Offshore-Spezialschiff sowie der ganze Bereich des Marineschiffbaus. Sämtliche aktuelleren Auftragseingänge nach Abbildung 1.1 sind aus diesem Segment. Damit haben die deutschen Werften bereits erfolgreich reagiert und sind bereit sich den Herausforderungen zu stellen. Für die entwickelnden Ingenieure bedeutet das den wertschöpfungsintensiven Bau von Unikaten bzw. Kleinstserien. Zu bedenken ist dabei aber, dass bei weiterhin negativ wachsender globaler Nachfrage auch in diesen Markt die Konkurrenz aus Fernost vordringt. So hat beispielsweise die in Rostock ansässige Reederei *AIDA-Cruises* zuletzt zwei neue Kreuzfahrtschiffe (Ablieferung 2015 bzw. 2016) ihrer Flotte in Japan bei *Mitsubishi Heavy Industries* bauen lassen ([26], [123]). Letztlich müssen den oben genannten Entwicklungen alle Bereiche der Schiffsentstehung gerecht werden. So ist auch im strukturell konstruktiven Entwurfsbereich immer wieder nach Möglichkeiten der Verbesserung zu suchen. Das bestätigte schon 2011 der damalige Hauptgeschäftsführer VSM, Werner Lundt, indem er darlegte, dass in den Industrieunternehmen *„heute Konsens (herrscht), dass Spezial-Knowhow und Innovationskraft die Treiber sind, mit denen der deutsche Schiffbau sich langfristig erfolgreich durchsetzen und behaupten wird. Daran arbeiten die Werften und Zulieferunternehmen und haben sich schnell auf die veränderten Bedingungen eingestellt.“*[140].

1.2 Ziele der Arbeit

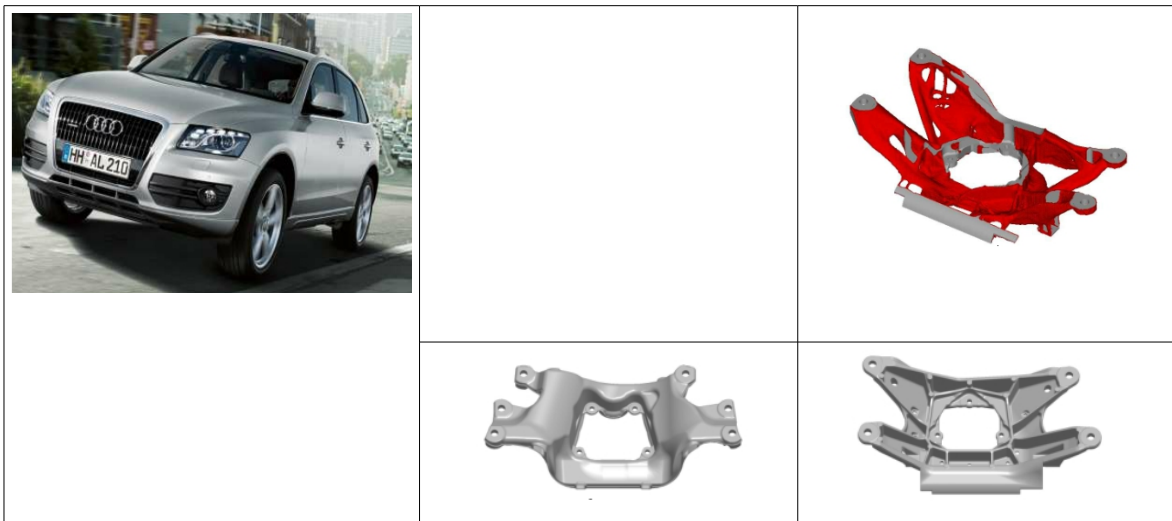
Neben der Funktion kommt in der Produktentstehung vor allem dem Bereich Werkstoff eine zentrale Bedeutung zu. Nach erfolgter Auswahl gilt es, das Material bestmöglich zu verwenden. Dies kann über die Art der Produktion, die Verbesserung von Werkstoffgütern und natürlich die Materialausnutzung realisiert werden. So hat sich in den letzten Jahren die materielle Topologieoptimierung als Werkzeug im Designprozess fest etabliert ([58], [83], [84], [117]). Für die Entwicklungsabteilungen vieler Industriezweige ist die Nutzung dieses Verfahrens mittlerweile selbstverständlich, Ergebnisse werden auch in der Fertigung umgesetzt. Aktuelle Beispiele aus dem Automobilbau, der Luft- und Raumfahrttechnik, dem allgemeinen Maschinenbau und sogar aus dem Gebiet der Architektur zeigt Abb.1.2.

Die dargestellten Anwendungsfälle beziehen sich auf Volumenbauteile. Trotz der im Schiffbau vorhandenen großen Dimensionen kommen dabei aber mechanisch gesehen fast ausschließlich flächenhafte Bauelemente zum Einsatz. Eine direkte Übertragbarkeit der üblichen Vorgehensweise anderer Industrien ist (neben anderen) auch aus diesem Grund nicht möglich. Dennoch kann nach Meinung des Autors die materielle Topologieoptimierung wichtige Impulse zur Konstruktionsverbesserung geben.

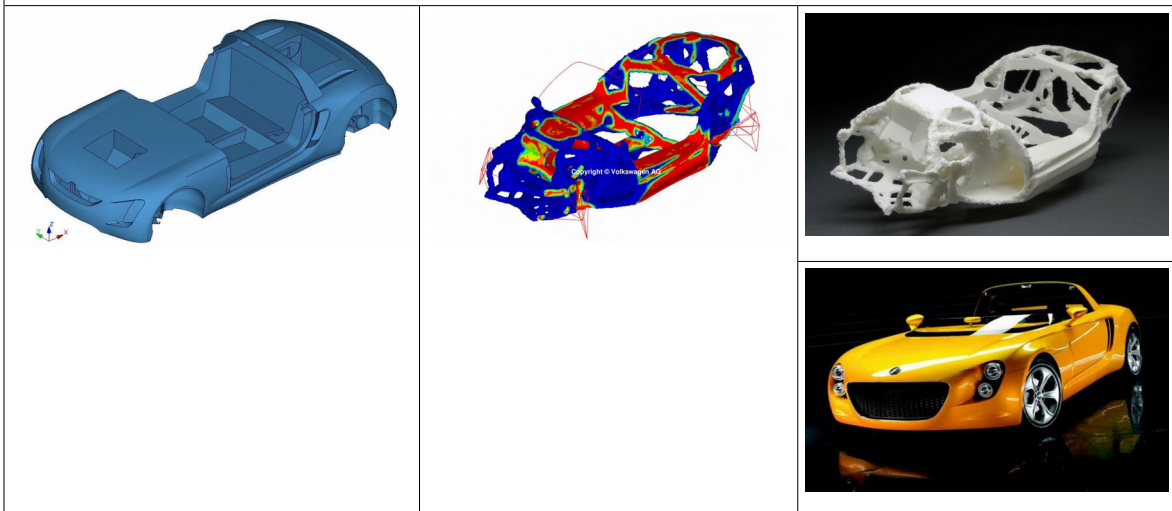
So werden im Rahmen dieser Arbeit Möglichkeiten für den Einsatz der materiellen Topologieoptimierung bei der Entwicklung von schiffstechnischen Konstruktionen vorgestellt und analysiert. Die Untersuchungsschwerpunkte liegen dabei auf:

- Reduzierung der Entwicklungszeit,
- Steigerung der Produktqualität sowie
- schiffbauliche Akzeptanz bzw. Anwendung.

Ziel ist es, die Methode der Topologieoptimierung bei schiffstechnischen Konstruktionen zu untersuchen und ein Verfahren zur Implementierung in den etablierten Schiffsentstehungsprozess zu entwickeln.



Getriebeaufhängung, Ziel Massereduktion; Copyright © Audi AG [64]



Automobilchassis, Ziel Strukturformfindung; Copyright © Volkswagen AG [26]



Architektur, Ziel Formfindung, © Skidmore, Owings & Merrill LLP sowie Isozaki [12]

Abbildung 1.2: Beispiele von Industrieanwendungen der Topologieoptimierung

1.2.1 Entwicklungszeit

Schiffe sind hochspezialisierte komplexe Konstruktionen die bezüglich Einsatzgebiet und Aufgabe sehr genau angepasst sind. Die Größe sowie die Bewegung der Struktur (Schiff) in beiden Medien Wasser und Luft sind einmalig im Schiffbau. Das führt dazu, dass es sich im Schiffbau immer um den Bau von Quasi-Prototypen handelt. (Klein-)Serien bzw. weniger anspruchsvolle Schiffe werden seit einiger Zeit in Europa bzw. Deutschland nicht mehr gefertigt, vgl. Abschnitt 1.1.

Die bei der Produktentstehung bekannte Diskrepanz zwischen Designfreiheit und Produktkenntnissen bzw. Produktkosten, wirkt sich somit im Schiffbau noch viel deutlicher aus, vgl. Abb. 1.1.

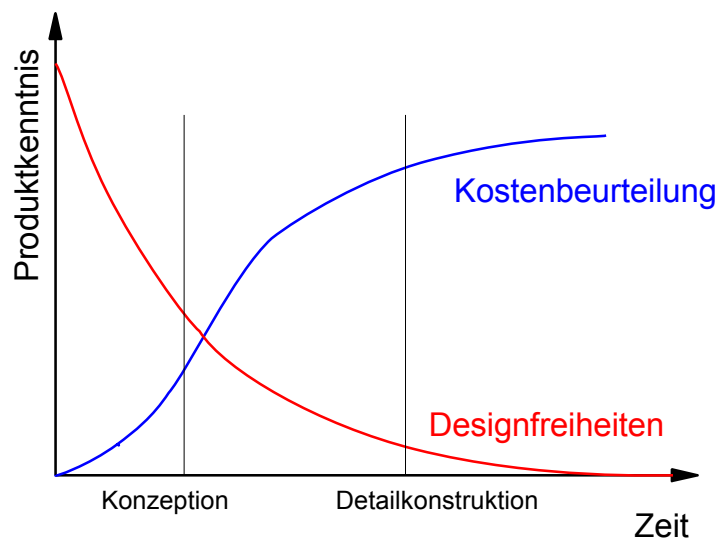


Abbildung 1.3: Dilemma der Konstruktion nach [136]

In sehr kurzer Zeit wird projiziert, konstruiert und produziert [22]. Schon innerhalb der ersten vier Wochen, der Initial Designphase, werden fast 80% der Gesamtkosten festgelegt ([22], [76]). Hinzu kommt, dass die Produktion in einer bestehenden Produktionsanlage stattfindet, so dass bereits im Entwurfsstadium auf eine entsprechende Kompatibilität geachtet werden muss [100].

Ein weiterer Aspekt der Entwicklungszeit ist die Unterteilung der Schiffsentstehung in zeitabhängige Phasen. Schritte vom Form-Entwurf, über den Strukturentwurf bis hin zur virtuellen Manufaktur sind stark untereinander abhängig. Durch die dabei vorhandene große Anzahl an verschiedenen und konkurrierenden Designobjekten erfolgt die globale Optimierung des Produktes und der für seine Fertigstellung nötigen Abläufe iterativ. *Evans Design Spirale* verdeutlicht diesen Zusammenhang, Abb. 1.4.

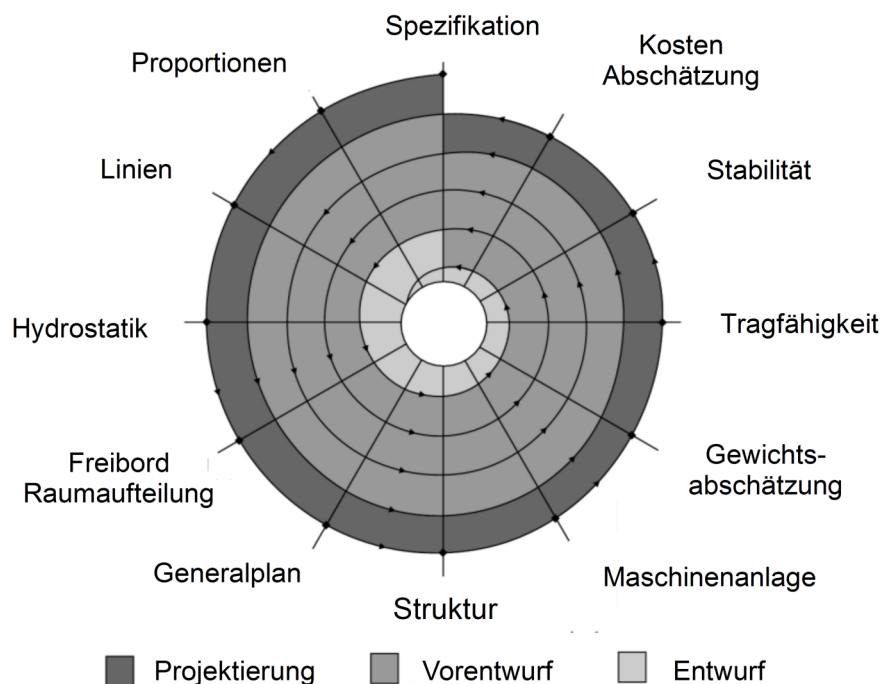


Abbildung 1.4: Entwurfsspirale, angelehnt an [36]

Mögliche Eingriffe mittels materieller Topologieoptimierung, die zur Verkürzung von Iterationen führen, erweitern somit zeitlich die Möglichkeiten (Freiräume) der gekoppelten Phasen oder aber verringern die Gesamtentwicklungszeit.

1.2.2 Produktqualität

Großschiffbau findet ausschließlich im globalen Wettbewerb statt. Um bestehen zu können, ist die Produktqualität für die beteiligte deutsche Industrie das wichtigste Element.

So konnte beispielsweise die FSG im Jahr 2012 einen wichtigen Neuauftrag für den Bau von Spezialschiffen akquirieren. Für den Auftrag konkurrierte die Werft auch mit günstigeren Wettbewerbern außerhalb Europas. Entscheidend für die erfolgreiche Einwerbung war aber die Produktqualität, so Peter Sierk, damaliger Geschäftsführer der FSG: *“Das zeigt, dass zuverlässige und technisch führende Produkte aus Nordeuropa sich dank ihrer Qualität den entscheidenden Marktvorteil gegenüber Angeboten aus Asien und anderen Teilen der Erde verschaffen können, die eben nur auf den ersten Blick günstiger sind.”* [23]

Die in dieser Arbeit fokussierte Entwicklung und Anwendung struktureller Optimierungsmethoden für den Schiffbau trägt zur Verbesserung der Schiffskonstruktion bei. Die Erhöhung der Produktqualität ergibt sich dabei aus den beteiligten Parametern, z.B. Masse, Festigkeit, Optik oder Haptik.

1.2.3 Anwendung

Ein wichtiges Anliegen der vorliegenden Arbeit ist die praktische Rückkopplung. Ziel ist es, Erkenntnisgewinne späteren Anwendern zugänglich zu machen, sodass schiffbauliche Entwurfs- bzw. Entwicklungsabteilungen dies auch praktisch einsetzen können in ihrer gewohnten Arbeitsumgebung. Anwendung setzt zuvorderst Kontaktaufnahme voraus. Gespräche mit Vertretern der Industrie folgten daher Veröffentlichungen mit ersten Konzepten ([133], [134] [135], [136], [137]). Sowohl bei den Vertretern der Industrie als auch der Forschung waren und sind die Reaktionen sehr positiv, sodass die Motivation da ist, die Forschung und Entwicklung auf diesem Gebiet voranzutreiben. Der Schwerpunkt der vorliegenden Dissertation liegt folglich auf der Entwicklung eines Verfahrens zur durchgehenden Anwendung der Topologieoptimierung im Schiffbau.

1.3 Gliederung der Arbeit

In der Reihenfolge der Kapitel spiegelt sich auch der gewählte Ansatz bei der Untersuchung von Implementierungsmöglichkeiten der strukturellen Topologieoptimierung für schiffbauliche Konstruktionen wieder.

Zunächst gilt es in Kapitel 3, den Stand der Forschung und Entwicklung näher zu beleuchten.

Theoretische Grundlagen, in Kapitel 4, bilden die grundlegende Säule zum Verständnis dieser Art der Strukturoptimierung. Daraus heraus kann dann die eigentliche Implementierung erfolgen. Dafür gewählt wird der induktiv synthetische Verallgemeinerungsansatz nach ARISTOTELES.

In Kapitel 5 werden zunächst schiffstechnische Konstruktionen in 2D am Ende der Detailkonstruktion untersucht. Für diese vereinfachten Beispiele können eigene Software-routinen, direkt aus den theoretisch gewonnenen Erkenntnissen, abgeleitet und programmiert werden.

Kapitel 6 beinhaltet dann das Verfahren zur praktischen Implementierung. Dem Verallgemeinerungsansatz folgend, wird einerseits der Grad struktureller Komplexität bis hin zu 3D-Großsektionen gesteigert. Andererseits wird auch der unterstützende Einsatz der Topologieoptimierung in der frühen Phase der Schiffsentwicklung untersucht. Dies zielt auf die Motivation der Verkürzung und Verbesserung des Entwicklungsprozesses ab.

Kapitel 7 widmet sich der Validierung. Mittels struktureller Festigkeitsanalysen können Aussagen zum Mehrwert für die schiffstechnischen Konstruktionen selbst getroffen werden.

In Kapitel 8 werden wesentliche Inhalte und Erkenntnisse dieser Arbeit zusammengefasst.

2 Konzept mechanischer Strukturoptimierung

2.1 Allgemeine Problemformulierung

Jegliche Form der Optimierung ist im mathematischen Sinne immer die Minimierung bzw. Maximierung einer gegebenen vektoriellen Zielfunktion $f(\mathbf{s})$.

Diese Zielfunktion ist dabei die mathematische Beschreibung der Problemformulierung. Wenn Nebenbedingungen (Restriktionen) vorhanden sind, liegt ein beschränktes, ansonsten ein unbeschränktes Optimierungsproblem vor. Restriktionen können sowohl als Gleichheitsnebenbedingungen $\mathbf{h}(\mathbf{s})$ auftreten, sowie auch als Ungleichheitsnebenbedingungen $\mathbf{g}(\mathbf{s})$.

Die Variablen s_i stellen die diskreten Entwurfparameter dar. Meist liegen auch dafür Restriktionen in Form einer unteren s_i^l und oberen Grenze s_i^u vor. Die Entwurfvariablen lassen sich auch vektoriell zusammenfassen:

$$\mathbf{s} = \begin{bmatrix} s_1 \\ \vdots \\ s_n \end{bmatrix} ; \quad \mathbf{s}_L \leq \mathbf{s} \leq \mathbf{s}_U \quad (2.1)$$

Die mathematische Notation des Optimierungsmodells kann damit wie folgt zusammengefasst werden:

$$\text{Zielfunktion:} \quad \min f(\mathbf{s}) = \max(-f(\mathbf{s})) \quad (2.2)$$

$$\text{Ungleichheitsrestriktionen:} \quad \mathbf{g}_j(\mathbf{s}) \leq 0 ; j = 1, \dots, m_g \quad (2.3)$$

$$\text{Gleichheitsrestriktionen:} \quad \mathbf{h}_k(\mathbf{s}) = 0 ; k = 1, \dots, m_h \quad (2.4)$$

$$\text{Explizite Restriktionen:} \quad \mathbf{s}_L \leq \mathbf{s} \leq \mathbf{s}^U ; \mathbf{s} \in \mathbb{R} \quad (2.5)$$

An einem kleinen Beispiel lässt sich zeigen, dass sich mit obiger Notation jede Art von Optimierungsproblem formulieren lässt, beispielsweise auch die Forderung einer Tragstruktur (die als FE-Modell vorliegt) nach maximaler Steifigkeit bei geringem vorgegebenem Gewicht:

- Zielfunktion
Was ist das Entwurfsziel? → z.B. maximale Steifigkeit der Gesamtstruktur
- Entwurfsvariablen
Was ist am Entwurf veränderbar? → z.B. Eigenschaften (Dichte) der FE-Elemente
- Restriktionen
Was muss beachtet werden? → z.B. Spannungsbegrenzungen

[Ungleichheitsrestriktion] und konstante Masse der Gesamtstruktur
(Gewichtsreduktion um x) [Gleichheitsrestriktion]

– Entwurfsmodell

Wie wird der Entwurf mathematisch beschrieben? → z.B. FE-Modell

2.2 Typen der Strukturoptimierung

Beispiele der heute üblichen praktischen Anwendungen entsprechend der Abschnitte 1.2.3 bzw. 3.2 beziehen sich aufgrund des hier zu vertiefenden Ansatzes vordergründig auf die materielle Topologieoptimierung. Sie stellt eine parameterfreie Teildisziplin der Strukturoptimierung dar, die beispielsweise nach Anwendungsbereichen bzw. Entwurfsvariablen unterschieden wird, vgl. Abbildung 2.1.

1. Die Querschnittsoptimierung bzw. Dimensionierung (im angelsächsischen Sprachraum Sizing) ist eine einfache Form der Optimierung, es werden die expliziten Zahlenwerte des zu Grunde liegenden Modells variiert. Meist handelt es sich dabei um Querschnittswerte einzelner Tragglieder bzw. Wandstärken aber auch Massen oder Federsteifigkeiten in einem Mehrkörpersystem. Damit stellt die Dimensionierung aber hohe Anforderungen an die Modellgenerierung, da das Entwurfsmodell aufwändig parametrisiert werden muss.
2. Die Formoptimierung bzw. Gestaltoptimierung baut auf einer topologisch bekannten und festgelegten Struktur auf. Variiert wird hier die Kontur im Hinblick auf eine optimale Oberflächenformgebung einer Struktur. Je nach Aufgabenstellung ist dieser Vorgang sehr komplex und zeitaufwändig.
3. Die Teildisziplin der Materialoptimierung hat als Entwurfsvariable das Material selbst. Im einfacheren Fall können mittels Materialauswahl Verbesserungen erzielt werden, z.B. Stahl, Aluminium, Magnesium,...). Meist stehen aber konfigurierbare Materialien im Fokus, d.h. vor allem die Orientierung von Fasern in Konstruktionswerkstoffen wie faserverstärkten Kunststoffen (FVK).
4. Die Topologieoptimierung liefert den allgemeinsten Zugang. Der topologische Aufbau der Struktur steht im Vordergrund und damit die Nachbarschaftsbeziehungen aller materiellen Punkte des Systems. Aus der Lage und der Anordnung dieser Entwurfsvariablen wird die Struktur erzeugt, der prinzipielle (mechanische) Aufbau des Tragwerkes wird generiert.

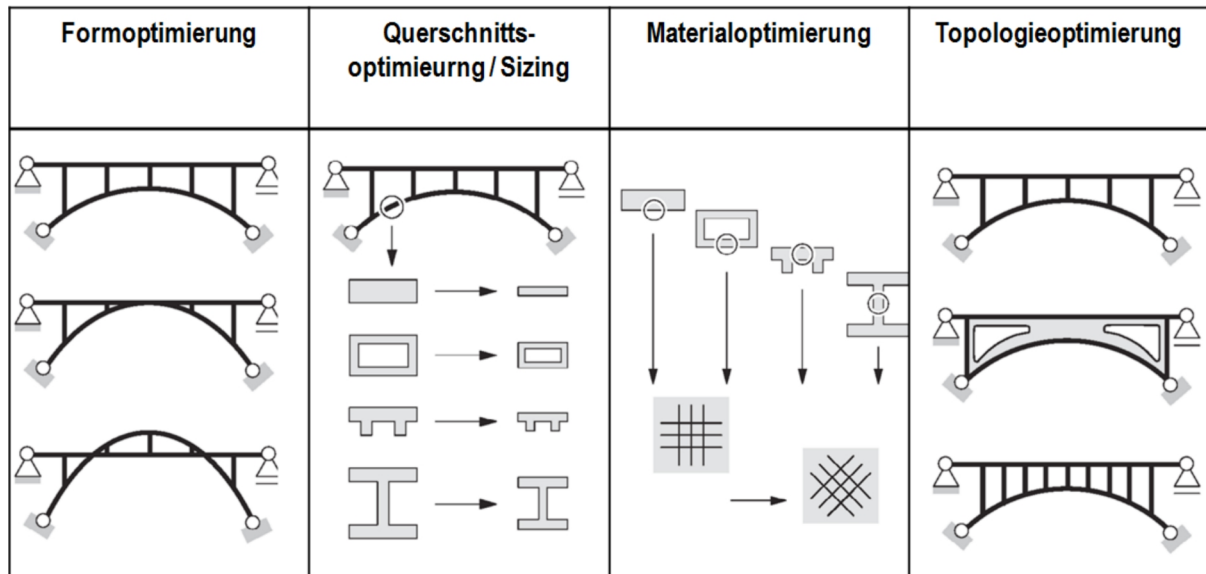


Abbildung 2.1: Arten der Strukturoptimierung nach [118]

2.3 Eingliederung der Optimierung in den Schiffbaudesignprozess

2.3.1 Topologieoptimierung

Verfahren der Strukturoptimierung sind in jeder Industrie seit langem etablierte Praxis. Für den schiffbaulichen Bereich trifft dies in Bezug auf die Topologieoptimierung nicht zu, wohl aber für andere industrielle Bereiche. Eine typische und praktische Vorgehensweise zeigt das Beispiel des Windkraftanlagenherstellers *Suzlon Energy*®. Für die Entwicklung von Bauteilen des Gondelhauses kommt eine Vielzahl von Struktur-optimierungsmethoden nacheinander zum Einsatz, vergleiche Abbildung 2.2:

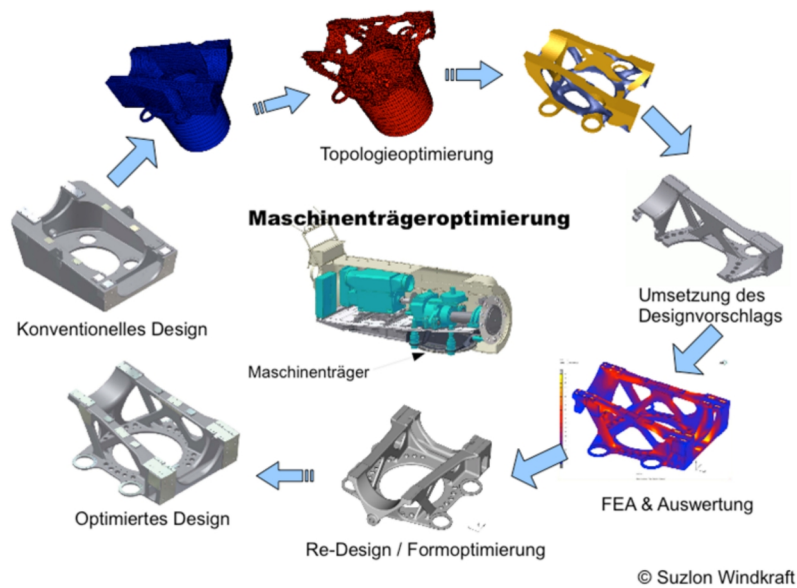


Abbildung 2.2: Maschinenträgeroptimierung einer Windkraftanlage [45]

Um ein konventionelles Design zu optimieren wird mittels Topologieoptimierung ein Designvorschlag entwickelt, anschließend detailliert konstruiert und ausgewertet. Abschließend findet mittels Formoptimierung eine Feinabstimmung statt, aus der dann das finale optimierte Design gebaut werden kann. Diese Vorgehensweise bildet so auch die Grundlage zur Prüfung und Implementierung der Topologieoptimierung in den Schiffbaudesignprozess.

2.3.2 Modellbildung des globalen Optimierungsproblems

Die iterative Prozedur zur Lösung des Optimierungsproblems kann gut mit dem *Drei-Säulen-Modell* nach ESCHENAUER [35] in Teilaufgaben gegliedert werden, Abbildung 2.3.

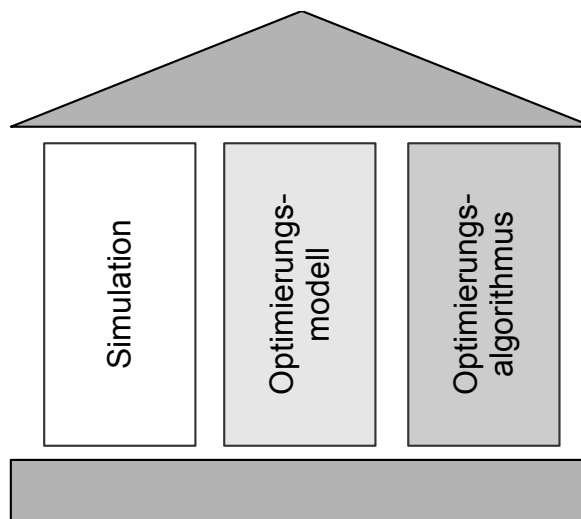


Abbildung 2.3: Drei-Säulen-Konzept der simulationsgebundenen Strukturoptimierung

Es enthält das Simulationsmodell der Strukturanalyse. Berechnete Strukturantworten wie Verformungen, Spannungen, Eigenfrequenzen o.ä. werden zur Bestimmung von Zielfunktionen und Restriktionen genutzt. Mithilfe der mathematisch abstrakten Formulierung des Problems stellt das Optimierungsmodell die Verbindung zum Optimierungsalgorithmus her. Die darin enthaltene Sensitivitätsanalyse liefert ein Maß für die Empfindlichkeit der Zielfunktion gegenüber Variablenänderungen. Der Optimierungsalgorithmus wiederum löst das Optimierungsproblem und liefert neue (verbesserte) Entwurfsvariablen. Bei gradientenbasierten Verfahren werden bei der Sensitivitätsanalyse die Gradienten bezüglich der Optimierungsvariablen bestimmt. Die Beziehungen lassen sich wie folgt darstellen:

2.3.3 Entwurfsziele bei Anwendung der Topologieoptimierung

Durch die direkte Kopplung der Topologieoptimierung an die Methode der finiten Elemente ist auch eine Vielzahl verschiedener Entwurfsziele denkbar. Jede Systemantwort einer finiten Elemente Analyse kann als Zielfunktion der Optimierung, in diesem Fall also des Auffindens eines prinzipiellen Layouts, oder als Restriktion dienen. Tabelle 1 zeigt überblicksweise Zielfunktionen, jeweils abgeleitet aus den bei der Finite-Elemente-Analyse zur Verfügung gestellten Strukturantworten:

Tabelle 1: Herleitbare Optimierungsziele aus den Strukturantworten einer FEA

Minimierung von:	Maximierung von:
Masse	Steifigkeit
Volumen	Eigenfrequenzen
Spannung (von Mises ~)	Frequenzbänder
Verformung / Verschiebung	Lüftung
Schallabstrahlung	Stabilität (Buckling Mode)
Beanspruchung	Massenschwerpunktslage

3 Stand der Forschung und Entwicklung

3.1 Entwicklung und Trends der Strukturoptimierung

Die Strukturoptimierung als Teilgebiet der mathematischen Optimierung sukzessive der angewandten Mathematik beschäftigt sich mit Problemen der mechanischen Optimierung, also der mechanisch bestmöglichen Gestaltung von Tragwerken. Ausgehend von der Luft- und Raumfahrtstechnologie und mit Hilfe der heute üblichen rechnergestützten Entwurfsprozesse, finden diese Verfahren (bestmöglicher Lösungen von Ingenieursaufgaben) mittlerweile in allen Industriezweigen weite Verbreitung. Da das Augenmerk der Arbeit aber im schiffbaulichen Umfeld liegt, wird darauf im Folgenden auch gesondert eingegangen.

Die Beschäftigung mit der Optimierung ist sehr alt. Schon die alten Griechen waren an der geometrischen Optimierung interessiert. So bewies beispielsweise der Philosoph und Mathematiker ZENODORUS (ca. 200 v.C.), dass von den ebenen Figuren der Kreis und von den Körpern die Kugel bei gleichem Umfang den größten Inhalt hat [52]. Im ausgehenden Mittelalter ist bei GALILEI (1564-1642) ein hervorragendes Beispiel in seinen berühmten Discorsi zu finden, der optimierte Kragbalkenquerschnitt [106].

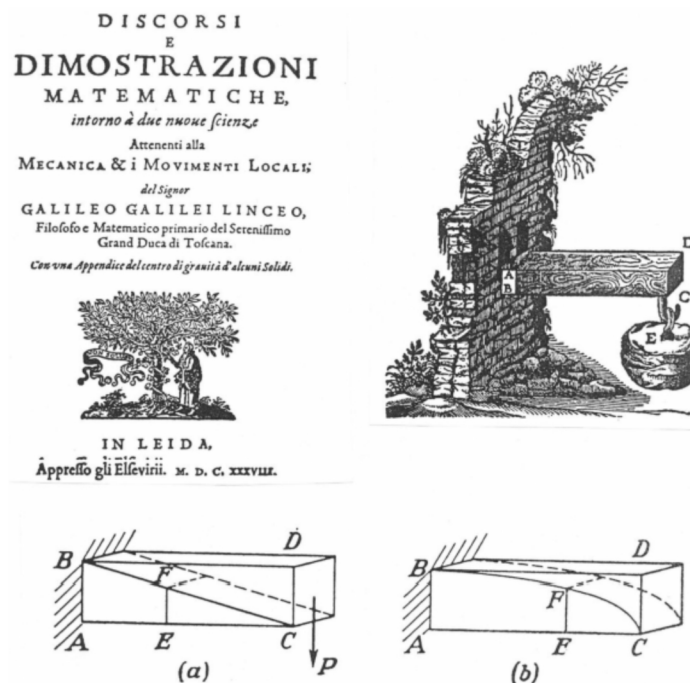


Abbildung 3.1: Querschnittsoptimierung eines Kragbalken nach Galilei [75]

Auch das Brachistochrone Problem, dass BERNOULLI gemeinsam mit LEIBNIZ, NEWTON und DE L'HOSPITAL löste, stammt aus dieser Zeit. LAGRANGE und FOURIER lieferten gegen 1750

wichtige Beiträge mit nach ihnen benannten Variationsrechnungen und den zugehörigen Multiplikatoren. Ab Ende des 19. Jahrhunderts vollzog sich dann die Entwicklung in der mathematischen sowie in der Strukturoptimierung parallel. Für die modernen Optimierungs-problemlösungen wichtige Namen wie KARUSH ,1939, KUHN und TUCKER 1951 (KKT-Nebenbedingung), DANTZIG 1947 (Simplex-Algorithmus) aber auch MICHELL 1904 (Michell-Strukturen) lieferten bedeutende Beiträge. Mit dem Einzug der digitalen Rechentechnik ab den 60er Jahren konnte sich die Finite-Elemente-Methode verbreiten, woran sich Entwicklungen zur Strukturoptimierung wiederum ankoppelten. In Bezug auf die Topologieoptimierung formulierten erstmalig ROZVANY und PRAGER grundlegende Optimalitätskriterien [113], [115]. Für die praktische Anwendung wichtigste Arbeiten lieferten letztlich 1988 BENDSOE und KIKUCHI [14]. Auch in den letzten Jahrzehnten haben sich weiterhin viele Wissenschaftler weltweit verdient gemacht. Und mit diversen am Markt verfügbaren Spezialsoftwareprodukten hat sich die Strukturoptimierung auch in der Wirtschaft etabliert.

Einige aktuelle Trends in der weiteren Entwicklung bei der Strukturoptimierung, Schwerpunkt Topologieoptimierung, werden nachfolgend kurz dargestellt.

So beschreibt SCHRAMM in [117] das noch vorhandene Potential, bedingt durch das einfach zu verstehende Konzept der Topologieoptimierung. Obwohl bereits viele Firmen dies in ihren Designprozess fest integriert haben, muss an der weiteren fertigungsgerechten Konstruktion bei der Entwicklung der Lösungsalgorithmen gearbeitet werden. Auch ist nach wie vor die Behandlung von Stabilitätsphänomen in der Topologieoptimierung problematisch.

Einen neuen aktuellen Berechnungsansatz für diesen Optimierungstyp beschreibt DÜSTER [33]. Das Entwurfsmodell basiert hier auf der Finite Zell Methode und zielt auf eine schnelle Konvergenz der Berechnungen.

Des weiteren existierten bisher keine industriell einsetzbaren Methodiken zur Topologieoptimierung bei nichtlinearen Fragestellungen. Hier ist in jüngster Zeit viel geforscht worden, wobei bisher im Ergebnis eine Äquivalenzmethode zur Behandlung solcher Probleme vorgestellt wurde [80]. Daran knüpft auch das Forschungsprojekt „Methodische und softwaretechnische Umsetzung der Topologieoptimierung crashbeanspruchter Fahrzeug-strukturen“ an, dass vom Bundesministerium für Bildung und Forschung bis 2012 gefördert wurde.

Einen ganz anderen Weg zur Erweiterung des Anwendungsspektrums geht die Firma FE-Design GmbH aus Karlsruhe. Sie hat erstmalig ein Softwaresystem zur Topologieoptimierung von geführten Strömungen vorgestellt.

Als letzter Trend sei an dieser Stelle auf Forschungsprojekte (DFG-Förderung) zur Erweiterung des Gesamtkonzeptes zur Optimierung entsprechend Abschnitt 2.3.2 um Multi-Agenten-Systeme (MAS) hingewiesen. So soll mit Hilfe dieser neuen Verbindung

von technischem Modell und verwendeter Optimierungsstrategie allgemein gültige, jederzeit einsetzbare Lösungsmethodologie bei technischen Problemstellungen bereitgestellt werden [53].

3.2 *Strukturoptimierung in der industriellen Praxis*

Die rechnergestützte Strukturoptimierung ist in der industriellen Praxis fest etabliert. Unter den verschiedenen Möglichkeiten anwendbarer Verfahren ist die Topologieoptimierung eine relativ junge Disziplin. Mit der rasanten Entwicklung der Computertechnologie einerseits und der Möglichkeit topologisch komplett neuer und verbesserter Designs andererseits, ist diese Disziplin in den unterschiedlichsten Industriezweigen etabliert.

3.2.1 Automobil- und allgemeiner Maschinenbau

Wie bereits Abbildung 1.2 beispielhaft zeigte, wurden in vielen Industriebranchen Methoden zur Strukturoptimierung bzw. Topologieoptimierung erfolgreich industriell eingesetzt. Das Augenmerk richtet sich dabei auch auf Aspekte der strukturellen oder sogar architektonischen Formfindung. Im klassischen Automobilbereich wird hingegen zumeist auf Gewichtsreduktion gezielt. Hier wird die Strukturoptimierung seit langem erfolgreich angewandt. So nutzt die Firma BMW schon seit den späten achtziger Jahren Optimierungsverfahren zur Dimensionierung [105]. Auch die Adam Opel AG setzt bereits seit 1992 [6] das auf MATTHECKS Arbeit [58] zurückgehende Programm SKO (Soft Kill Option) ein. Exemplarisch für diesen Industriezweig zeigt Abbildung 3.2 die Topologieoptimierung eines Rahmenträgers bei einem LKW. Angewendet im Rahmen der Detailkonstruktion, war das Ziel der Optimierung eine deutliche Gewichtsreduktion für das Serienbauteil.

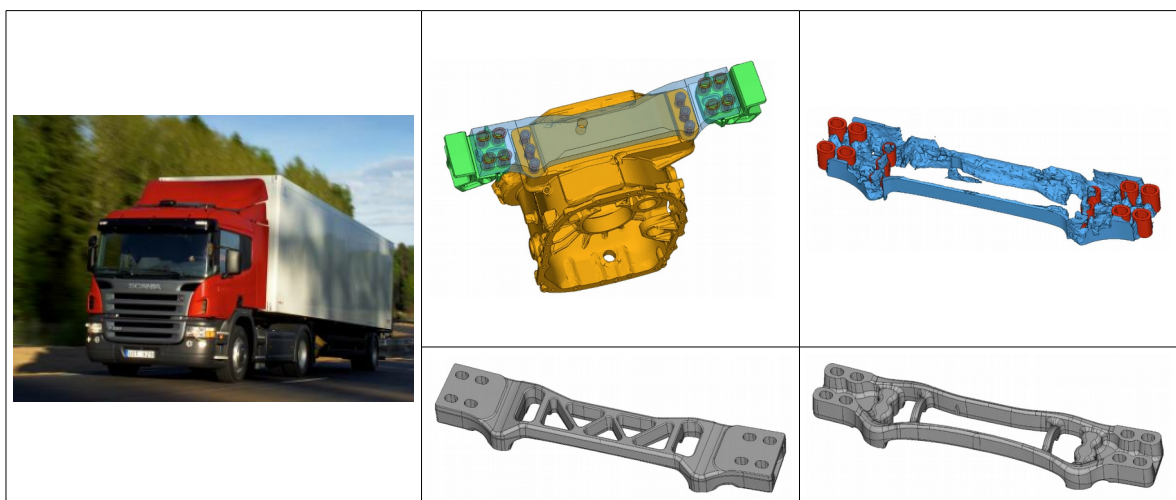
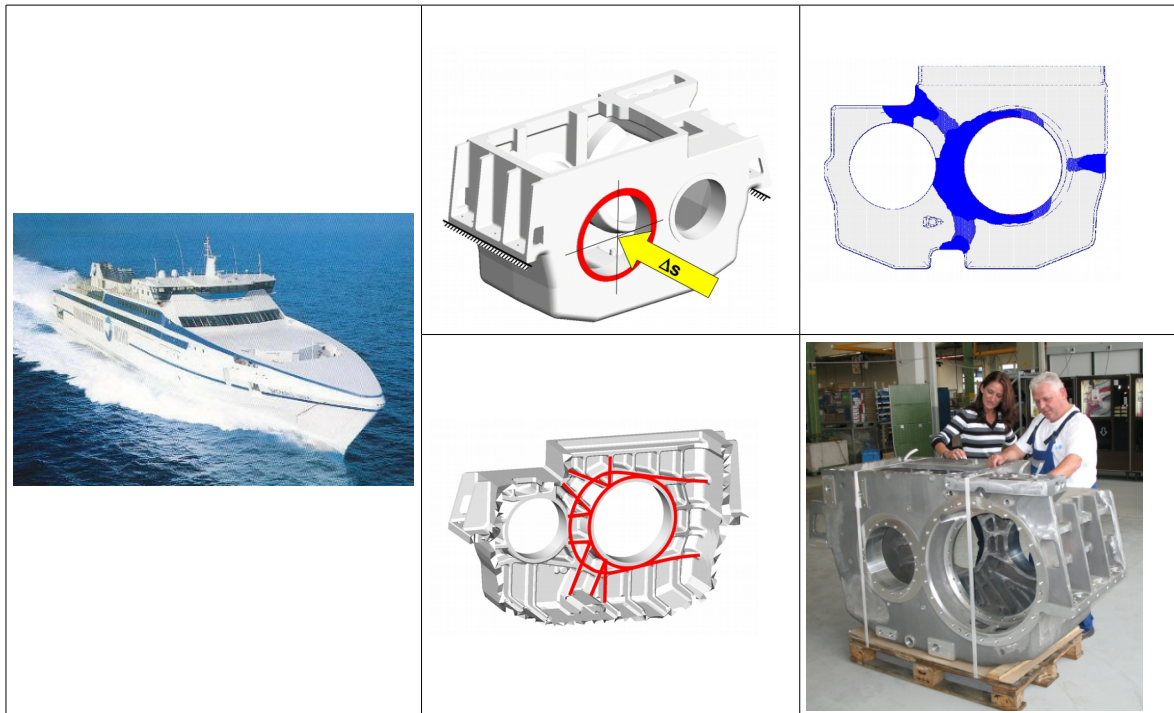


Abbildung 3.2: Topologieoptimierung Motorträger, Ziel Gewichtsreduktion; Copyright © Scania AG Schweden [112]

Ein weiteres Beispiel, dass schon aus dem Bereich der Zulieferer der maritimen Branche stammt, zeigt Abbildung 3.3. Der deutsche Getriebehersteller ZF optimiert eine Serie von Getriebeboxhäusern für den Einsatz in Megayachten mit dem Ziel der Gewichtsreduktion.



*Abbildung 3.3: Topologieoptimierung Getriebeboxhaus, Ziel Gewichtsreduktion;
Copyright © ZF Friedrichshafen AG [28]*

3.2.2 Luft- und Raumfahrttechnik

Gerade die Luft- und Raumfahrtindustrie hat mit dem Einsatz von Topologie- und Formoptimierung bei der Strukturauslegung Pionierarbeit geleistet und setzt bereits während der frühen Entwicklungsphase entsprechende softwaregestützte Werkzeuge zur Gewichtsreduzierung ein [24]. Am Beispiel von Konstruktionselementen zur Versteifung der Tragflügel des Großraumflugzeuges A380 der Firma Airbus S.A.S. wird die firmenbezogene Anwendung der Gestalt- und der Topologieoptimierung kurz skizziert. Unter Einhaltung der Restriktionen bezüglich Stabilität und Spannung, ist das Ziel der Optimierungsrechnung das Gewicht der Versteifungselemente und somit das Gesamtgewicht des Flugzeuges zu reduzieren, bei gleichzeitiger Maximierung der Gesamtsteifigkeit der verbleibenden Versteifungselemente. Abbildung 3.4 zeigt im oberem Bereich zunächst das gesamte Flugzeug A 380 sowie daneben den zugrunde liegenden Bauraum des Flügelspantes mit dazugehöriger Ergebnisvisualisierung der Topologieoptimierungsrechnung. In der zweiten Zeile der Abbildung sind die aus der Berechnung umgesetzte Konstruktion aller Hauptversteifungselemente und die beispielhafte Fertigung des Querspantes dargestellt.

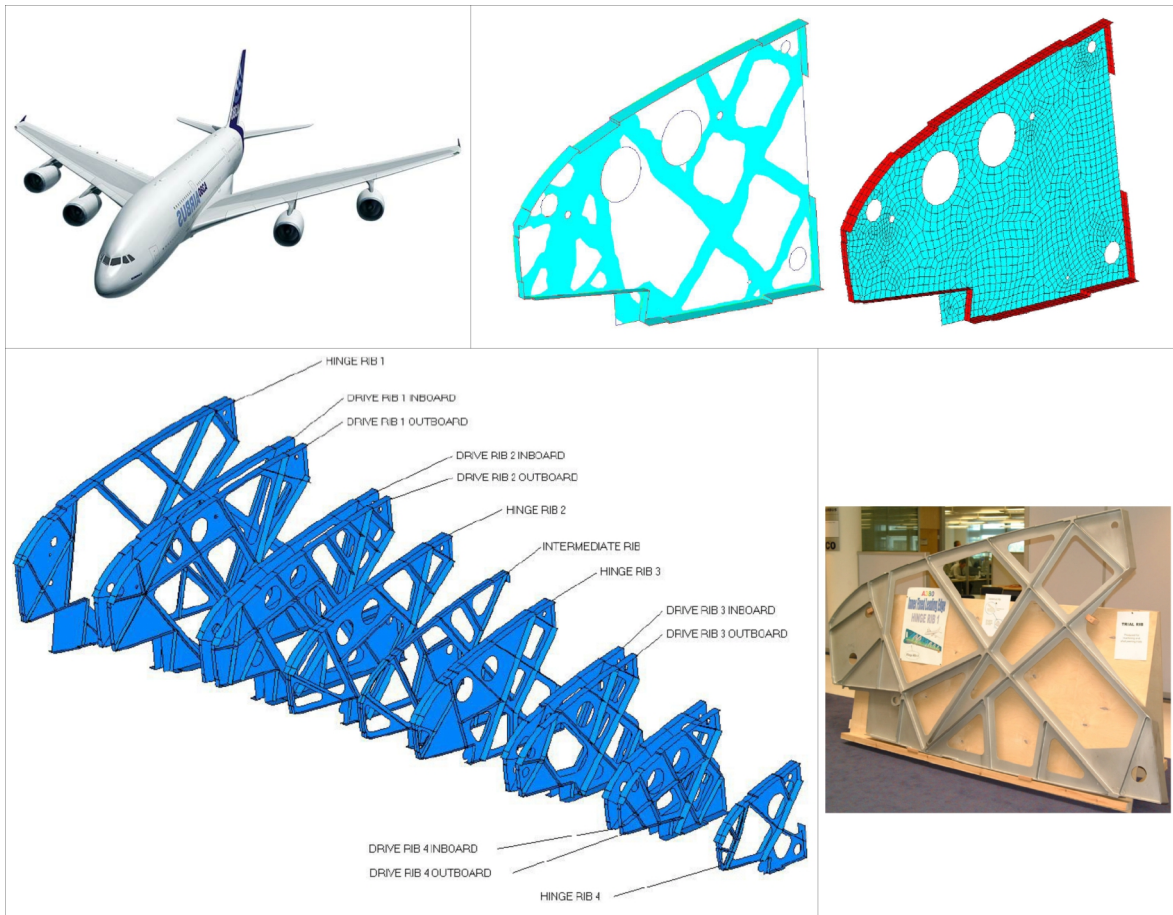


Abbildung 3.4: Topologieoptimierung des Querspantes eines A380 mit Fertigungsaussicht [4]

Das Ergebnis, der in diesem Beispiel angewandten Topologieoptimierung, ist, eine Gewichtsreduzierung aller in den Tragflügeln des Airbus A380 verwendeten Spanten (Hauptversteifungselemente). Die Strukturmasse konnte um insgesamt mehr als 500kg abgemindert werden. Auch Konkurrent Boeing nutzt für die Entwicklung des Langstreckenfliegers 787 Dreamliner die Topologieoptimierung in ähnlicher Weise zur Verbesserung der Querspanten der Tragflächen. Um das Potential der Struktur-optimierungsverfahren ausnutzen zu können, müssen diese laut AMOROSI [4] so früh wie möglich in den Entwurfsprozess eingegliedert werden. Dies sorgt für Zeitersparnis im Vorentwurf, sodass in der Detailentwurfsphase weiter verbessert werden kann. So war Boeing in der Lage das Gewicht des Dreamliners um 12% zu senken.

3.2.3 Stand der Anwendung im Schiffbau

Auch im maritimen Bereich sind Strukturoptimierungsverfahren seit längerem bekannt. Das deren Einsatz gerade in Bezug auf die Topologieoptimierung aber bisher noch keine breite praktische Anwendung fand, ist im Industriezweig selbst begründet.

Besonderheiten des schiffbaulichen Entwurfs

Anders als zum Beispiel im Automobil- oder Flugzeugbau steht im Schiffbau, wie in Abbildung 3.5 dargestellt, sehr wenig Entwicklungszeit zur Verfügung.

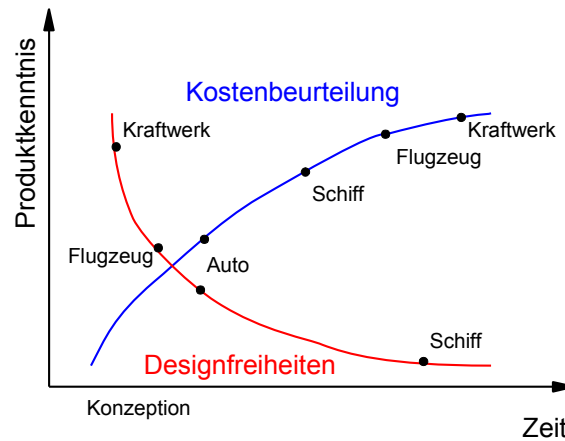


Abbildung 3.5: Entwicklungsvergleich technischer Produkte angelehnt an [76]

Trotz immens hohem Zeit- und Kostendruck, werden, wie bereits in eingangs geschildert, seit dem Auslaufen des Containerschiffbaus nur noch Quasi-Prototypen in den deutschen Orderbüchern geführt. Hinzu kommt, dass immer Werftspezifika berücksichtigt werden müssen, das heißt die Produktionsanlagen für den Bau sind schon komplett festgelegt.

Diese besonderen Rahmenbedingungen finden sich im Entwurf wieder. Letztlich erfordern die Produktgröße, das hohe Maß an Komplexität, der Einbezug von Einsatzzweck, Einsatzgebiet und Fertigungsumfeld immer einen Kompromiss beim Design.

Neben den sekundären Produkt- und Produktionsspezifika führen auch primäre Gründe des Designprozesses selbst dazu, dass die Implementierung und Anwendung der Topologieoptimierungsmethoden für den Schiffbau nicht trivial ist. Anhand des Schiffsentstehungsprozesses lassen sich dafür wichtige Gründe ableiten:

- *Organisationsstruktur im Designprozess*

Beim iterativen Schiffsentwurfsprozess müssen Anforderungen an Hydrodynamik, Hydrostatik und Festigkeit berücksichtigt werden. Diese Abgrenzungen spiegeln sich auch in den verschiedenen Entstehungsphasen wieder. In den oft noch vertikal und zudem werftspezifisch angeordneten Phasen folgt der Stahlentwurf der Projektierung. Geprägt vom Wechselspiel von Konstruktion und Entwurf, bereitet dieser mit einer Vielzahl von Iterationen die Detailkonstruktion vor. Bemessungsgrundlage bilden dabei sowohl Dimensionierungsvorschriften von Klassifikationsgesellschaften, als auch direkte Berechnungen mit der FEM. Modelle auf globaler Ebene werden oft an externe Dienstleister und zu einem fortgeschrittenen Zeitpunkt vergeben [76]. Diese Berechnungen

dienen dem Nachweis der globalen Festigkeit. Erkenntnisse fließen meist erst nach Abschluss der Basiskonstruktion und den lokalen Dimensionierungen zurück. Da aber auch eine mögliche Strukturoptimierung auf finiten Elemente Berechnungen basiert, ist folglich einerseits die Integration schwierig und weiterhin die positive Einflussnahme einer Anwendung der Methode nicht mehr möglich.

– *Lastannahmen*

Im Gegensatz zu anderen Fortbewegungsmitteln bewegen sich Schiffe in zwei verschiedenen Medien. Der Seegang ist hochgradig stochastisch und nichtlinear, so dass eine Vielzahl von Belastungen mit der Annahme von diversen Ladefällen des Schiffes und Seegangszenarien zu berücksichtigen sind. Die Belastungen führen dabei zu Beanspruchungen auf allen Ebenen des Schiffes, der globalen, der Substrukturebene sowie der lokalen Ebene. Eine Übersicht über geregelte dimensionsierungsrelevante Belastungsarten im Großschiffbau zeigt Tabelle 2 am Beispiel von Doppelhüllentankern.

Tabelle 2: Dimensionsierungsrelevante Lastarten bei Doppelhüllentankern nach [46]

Belastungskategorie	Lastarten	Beschreibung
Betriebsbelastung	Gewichtslasten des Schiffes	Stahlmasse, Masse Ausrüstung Masse Maschinen und Anlagen
	Auftriebslasten	Auftriebsverteilung des Schiffes
	Variable Lasten	Cargo Ballastwasser Versorgungssysteme Personal und temporäre Ausstattung
	Weitere Belastungen	Schleppvorgänge, Täue u.ä. Anker und Ladegeschrir Onboard Verladesysteme
Umweltbelastung	Zyklische Wellenbelastungen	Dynamische Wellendrucklasten
		Dynamische Lasten und dynamische Tankdrücke infolge Schiffsbeschleunigungen
	Schock- und Resonanzbelastungen	Bodenstöße infolge Wellenschlag Seitliche Wellenschlagstöße Sloshing in Tanks Überkommen von grünem Wasser
Außergewöhnliche Belastung		Fluten von Compartments (Räumen)
Verformungsbelastung		Thermische Lasten und Vorverformung

Relevanzen, Interaktionen oder auch Wichtungen für das Dimensionieren bei einer derart komplexen Struktur Schiff einerseits sowie das erforderliche hohe Sicherheitsniveau

andererseits führen dazu, dass nach wie vor zwei Arten der Dimensionierung gültig sind.

Die Bemessung kann nach Regeln von Klassifikationsgesellschaften oder mit Hilfe direkter Berechnungsmethoden („First Principle Methods“) erfolgen [29]. Für erstere zeigen sich gutachterlich auftretende Klassifikationsgesellschaften verantwortlich, die im Schiffbau hoheitliche Aufgaben besitzen. Deren Regeln und Formeln beinhalten eigenes Wissen aus über 100 Jahren Überwachung im Bau und Betrieb von Schiffen, sodass auch statistische und stochastische Anteile in die analytischen Regeln implementiert sind. Zunehmend hat sich daneben das Bemessen mit numerischen Verfahren, die von direkten Berechnungen (First Principles) getragen werden, etabliert. Für Festigkeitsanalysen wird dabei fast ausschließlich die Methode der finiten Elemente genutzt. Der Einsatz leistungsfähiger Hard- und Software, die in der Lage sein muss, die Komplexität von Modell und Rechenmethode abzubilden, stellt bei den praktischen Planern eine immer geringer werdende Hürde dar. Realitätsnahe Simulationen bedingen aber zudem ausreichendes Wissen und die Überführbarkeit eingangs genannter Belastungen in physikalische Modelle und die sich anschließende mathematische Formulierung. Die Anwendung von Methoden der rechnergestützten Topologieoptimierung sind nur bei dieser Dimensionierungsart möglich, wobei die hohe Sensibilität des Verfahrens auf die modellierten Belastungen eine wesentliche Herausforderung innerhalb des schiffbaulichen Umfeldes darstellt.

– *Schiffbauliche Konstruktionswerkzeuge*

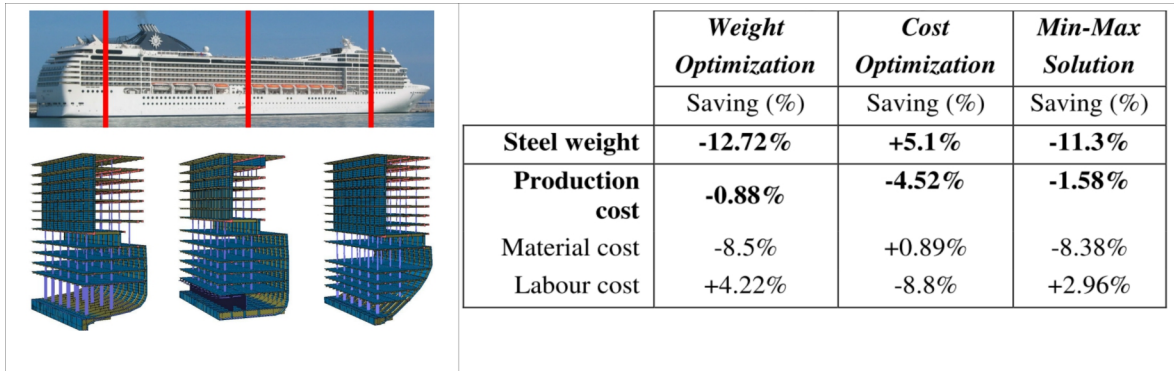
In deutschen Werften finden vielerlei Softwaresysteme Verwendung. Neben allgemeinen maschinenbaulichen gibt es eine Reihe von schiffbauspezifischen Werkzeugen gerade im Strukturentwurf und der Detailkonstruktion. Das Objekt Schiff wird dabei anders als üblich in 2,5D modelliert und verwaltet. So erfolgt die Orientierung und Eingabe an zweidimensionalen Querschnitten, (in Schiffsquerrichtung als Spantaufmaßtabellen). Die dritte Dimension, die Schiffslängsrichtung, wird über Extrapolation realisiert. Extrapolationsraster variieren dabei zwischen stahlbaulicher Konstruktion (Konstruktions-spannten) und Entwurfsphase der Hydrostatik (Entwurfsspannten). Sowohl Verwaltungs- bzw. Modellierungsart als auch die in der praktischen Anwendung befindlichen verschiedenen Programmsysteme sukzessive Inkompatibilitäten bedingen die große Schwierigkeit Konstruktions- und Berechnungsphasen weiter zusammenzuführen und so Topologieoptimierungsverfahren zu ermöglichen.

Insgesamt ist ein umfassender und vor allem industrieller praktischer Einsatz von Strukturoptimierungsmethoden bzw. Topologieoptimierungsmethoden in einem frühen Stadium im Schiffbau in der Vergangenheit nur schwer möglich gewesen. Natürlich gibt es Ansätze, teils sogar langjährige und dokumentierte. Dabei handelt es sich vor allem um akademische Beispiele zur Strukturoptimierung in der Schiffbau-Industrie. Über die Umsetzung des Workflows im Sinne dieser Arbeit ist nichts bekannt. Nachfolgend seien

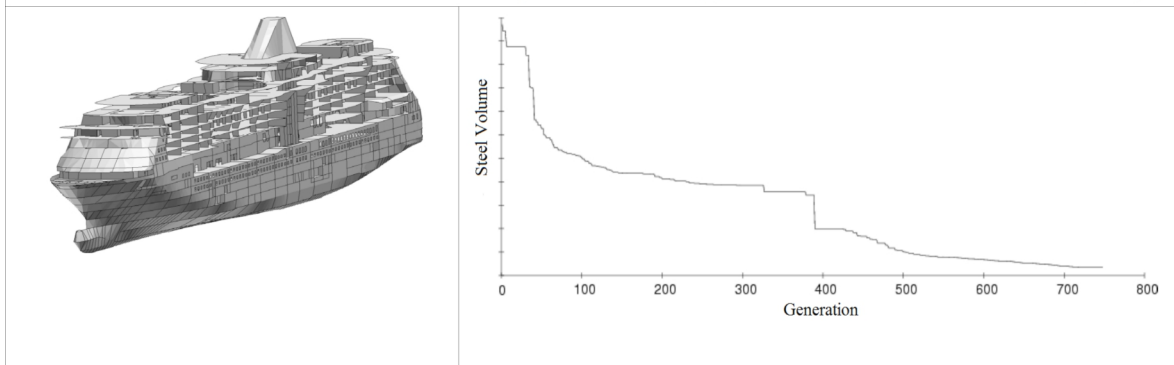
kurz einige dieser Beispiele genannt. Diese zeigen aber auch, dass beim Teilgebiet der strukturellen Topologieoptimierung gerade erste schiffbauliche Entwicklungsansätze, vorwiegend in Asien, beschritten werden.

Dokumentierte Beispiele aus dem Spezialschiffbau

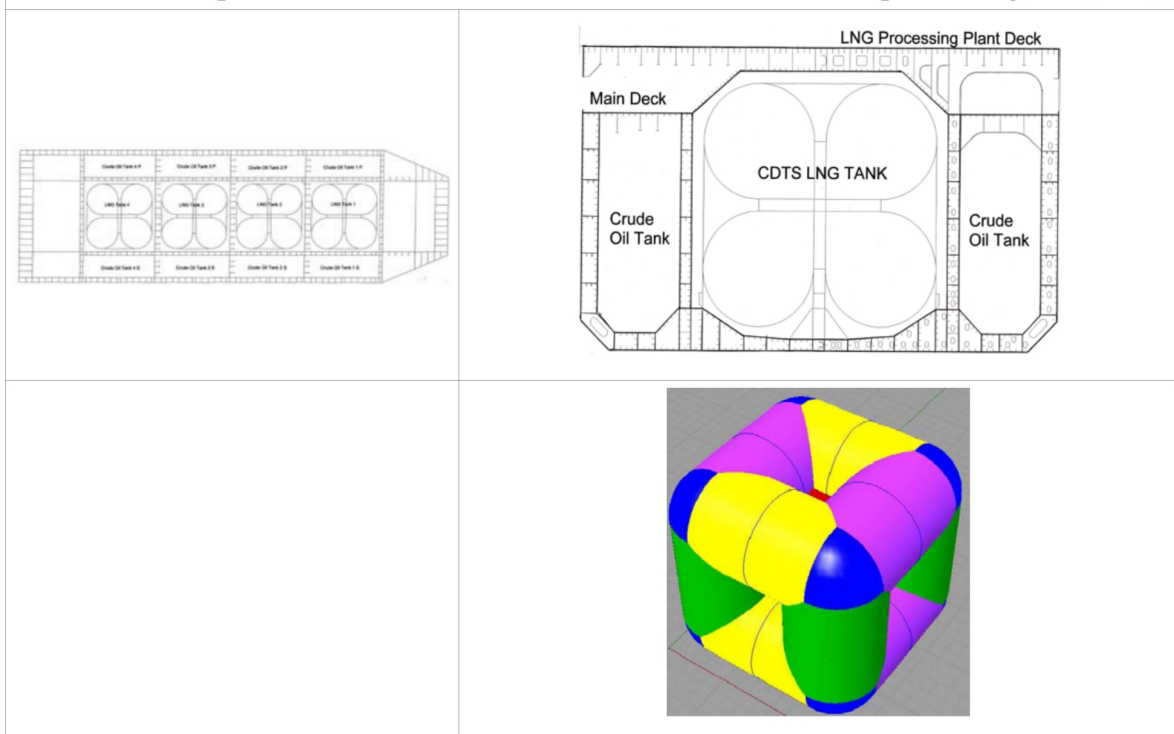
Anders als im Yachtbau sind Beispiele der praktischen Umsetzung im Großschiffbau für die materielle Topologieoptimierung nicht bekannt, wohl aber für andere Typen der Strukturoptimierung. So beschäftigen sich die Forschungsarbeiten des Instituts ANAST/Belgien unter Leitung von Professor Rigo seit langem mit Themen der Strukturoptimierung, siehe beispielsweise [109], [110], [111]. Schwerpunkte dabei sind vor allem die Querschnittsoptimierung (auch Sizing) von Schiffsquerschnitten. So ist durch Professor Rigo mittlerweile die Software LBR-5 [11] entworfen und erfolgreich getestet worden, siehe Abbildung 3.6 oben. Diese zielt auf die Anwendung der Optimierung von Hauptspantquerschnitten. Forschungsarbeiten in Bezug auf die Optimierung von Plattenquerschnitten und dazugehörig die Anordnungsvariation von Untersteifungen sind aber schon lange betrieben worden. So veröffentlichte bereits 1960 HARLANDER einen Artikel zur optimalen Versteifungsanordnung bei verschiedenen Ladezuständen [56]. Auch PENTSCHEW [103] und KALTOFEN [69] gingen in Ihren Arbeiten am Institut für Schiffbau der Universität Rostock auf die Querschnittsoptimierung im Bereich Handelsschiff ein. Das Augenmerk lag auf analytischen Methoden, bedingt durch den Stand der Computertechnologie waren numerische Verfahren noch ganz am Anfang der Entwicklung. Dies änderte sich aber rasch. So ist 2001 bzw. 2004 eine Zusammenarbeit von ANSYS Inc., Dynardo und der Papenburger Jos. L. Meyer Werft dokumentiert [108]. Mit dem Ziel der globalen Gewichtsreduktion wird das Modell eines Kreuzfahrtschiffes der Werft einer globalen Optimierungsrechnung unterzogen, Abbildung 3.6 Mitte. Mit Hilfe von Evolutionsstrategien sind beim modellierten FE-Modell die Wanddicken flächiger Stahlelemente (Schalenelemente) variiert worden. Im Ergebnis der Arbeiten konnte gezeigt werden, dass signifikante Materialeinsparungen möglich sind. Außerhalb der stahlschiffbaulichen Konstruktion kommen aber mittlerweile verstärkt Topologieoptimierungsmethoden zur Anwendung. So basiert das von Professor LAMB vorgestellte Containmentsystem für den Transport von LNG auf Forschungsarbeiten mit dieser Methode, Abbildung 3.6 unten.



Screenshot LBR-5 Software sowie Beispielanwendung an einer ConRo-Fähre, aus [110]



Modell des zu optimierende Kreuzfahrtschiffes sowie Verlauf der Optimierung, aus [108]



2D-Schiffsmodell, Hauptspantquerschnitt, Topologieoptimierungsergebnis und LNG/CNG Containment Systembox (CDTS-Cubic Doghnut Tank System), aus [79]

Abbildung 3.6: Beispiele von Strukturoptimierungen im Großschiffbau

4 Theorie mechanischer Strukturoptimierung

4.1 Vorbetrachtungen

Nachdem in Kapitel 2 bereits das Konzept der Strukturoptimierung mit dem Optimierungsmodell eingeführt wurde, werden in Vorbereitung auf den eigenen Verfahrensentwurf vorwiegend die verbleibenden zwei Säulen der globalen Problemformulierung näher erörtert. Am Anfang steht ein Startentwurf mit den vektoriellen Parametern der Optimierung s sowie der Struktur x . Daraus wird ein Analysemodell abgeleitet, Strukturantworten u werden ermittelt. Da sich diese Arbeit vordergründig der Methode der finiten Elemente bedient, handelt es sich um approximierte Größen $u^h(x, u)$. Im Optimierungsmodell erfolgt die Festlegung der Entwurfskriterien, also Optimierungsparameter s , Zielfunktion $f(s)$ und Nebenbedingungen $[g(s), h(s)]$ sowie gegebenenfalls die Ermittlung der Gradienten der Entwurfsvariablen. Mit Hilfe dieser rein mathematischen Formulierung kann der problemspezifische Optimierungsalgorithmus die Optimierungsvariablen zielgerichtet bestimmen und verbesserte Entwurfsvariablen übergeben. Abbildung 4.1 zeigt die iterative Prozedur schematisch anhand der drei wichtigen Säulen.

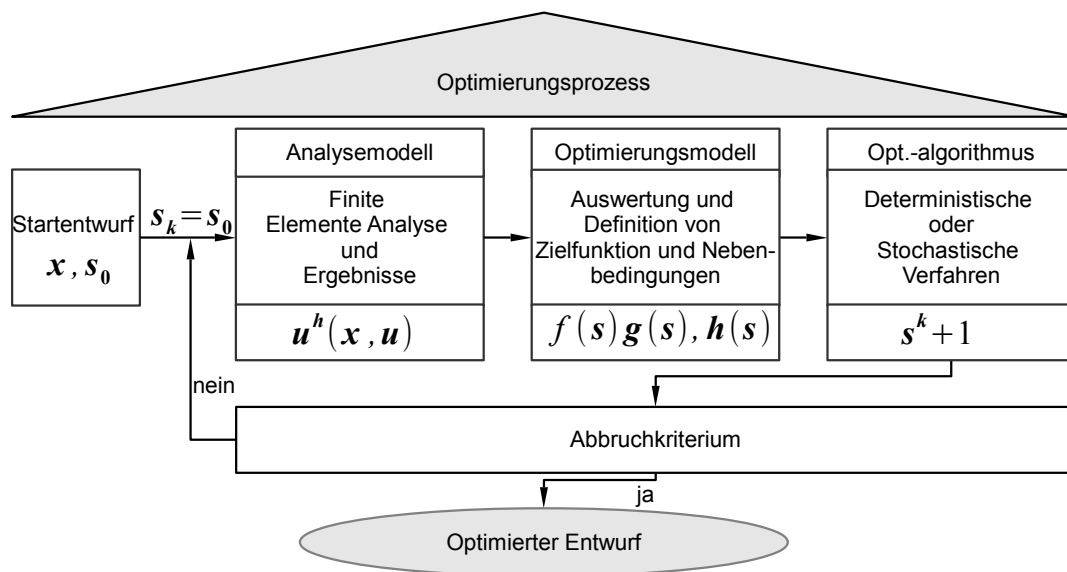


Abbildung 4.1: Schleife der Optimierungsprozedur

4.2 Simulationsmodell – Finite Elemente (Struktur)analyse

Die Lösung des Optimierungsproblems beinhaltet neben den Optimierungsmodellen und -algorithmen zunächst das Simulationsmodell zur Ermittlung der Strukturantwort, vergleiche 2.3.2. Dieses wird üblicherweise mit der Methode der finiten Elemente gelöst.

In diesem Kapitel soll daher ein kurzer Überblick über die Finite-Elemente-Methode (FEM) gegeben werden. Mit dem Blickwinkel der anschließenden praktischen Überführung wird in der Theorie vordergründig auf Scheibenelemente und statische Berechnungen eingegangen, da diese dem schiffbaulichen Beispiel zur software-technischen Umsetzung zugrunde liegen.

Die Methode der finiten Elemente kann auf verschiedene Weisen hergeleitet werden. Einzelne Ansätze werden in der grundlegenden Literatur zur FEM, beispielsweise in [10], [47], [57], [65], [70], oder [146] sowie in den entsprechenden Vorlesungsreihen technischer Studiengänge ([42], [43], [67], [68], [116]) intensiv behandelt. Im Folgenden wird Bezug genommen auf schiffbauliche Anwendungsbereiche und deshalb auf die Ausführungen bei KAEDING [43] zurückgegriffen.

4.2.1 Grundlagen

Die Analyse und Lösung realer meist technischer Fragestellungen ist ein wichtiges Aufgabengebiet des Ingenieurs. In der Regel werden diese mit physikalischen und

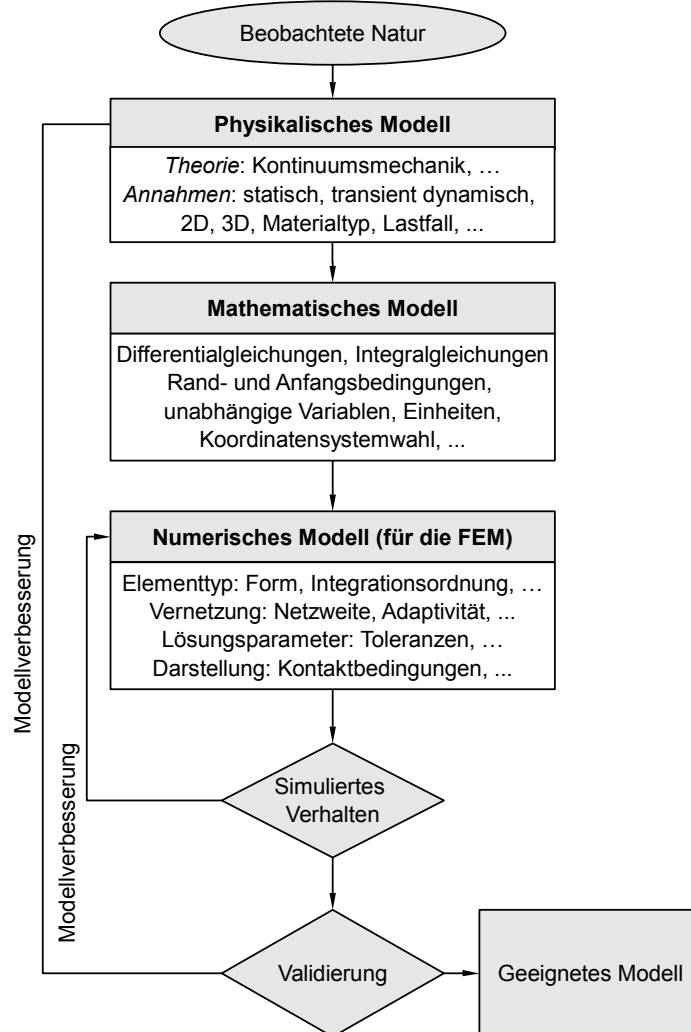


Abbildung 4.2: Schema zur Modellierung als iterativer Prozess

geometrischen Idealisierungen und Vereinfachungen iterativ gelöst, vgl. Abb 4.2.

Im Anschluss an die Überführung des beobachteten Verhaltens in physikalische Modelle sukzessive mathematische Modelle, stellt die Methode der finiten Elemente ein wichtiges und modernes Näherungsverfahren zur numerischen Behandlung vielfältigster Strukturen dar. Dies gilt insbesondere für in Bezug auf Geometrie oder Randbedingungen hochkomplexe Strukturen, bei denen klassische Methoden mit analytischen Lösungen nicht mehr anwendbar sind. Obwohl die Ursprünge mindestens bis in die fünfziger Jahre des vergangenen Jahrhunderts zurückreichen, verhalf erst die rasante Entwicklung der Computer- und Rechentechnik zur globalen Verbreitung, sodass diese Methode mittlerweile aus der Ingenieurspraxis nicht mehr wegzudenken ist. Sie stellt ein numerisches Verfahren zur näherungsweise Lösung partieller Differentialgleichungen mit Randbedingungen dar. Damit ist die FEM das praktisch wichtigste Berechnungswerkzeug für nahezu alle kontinuumsmechanisch behandelbaren Bereiche der Physik. Der Grundgedanke des Verfahrens ist vergleichsweise einfach - ein Kontinuum, bestehend aus unendlich vielen sprich infiniten Teilen, wird für die Berechenbarkeit in eine endliche (finite) Anzahl von Elementen und zugehörigen Knoten zerlegt, die sodann das Kontinuum repräsentieren. Die Idee hinter der FEM ist ein Verschiebungsverfahrensansatz, nämlich das Prinzip virtueller Verrückungen (PvV). Die Spannungen werden immer aus einer Nachlaufrechnung ermittelt, daher umfasst die Methode mehrere aufeinanderfolgende wesentliche Schritte:

1. Modellierung und Gebietsdiskretisierung mit finiten Elementen
2. Aufstellung von numerischen Elementgleichungen – Arbeitsintegral des Elements
3. Zusammensetzung (Assemblierung) der Elementgleichungen
4. Bildung der (elementweisen) Ansatzfunktionen für die Verschiebungen
5. Lösung über Einsetzen und Auswerten der Verschiebungsansätze in das Arbeitsintegral
6. Nachlaufrechnung, Konvergenz und Fehlerabschätzung

Das Aufstellen der Elementgleichungen erfolgt dabei mit Extremalprinzipien wie dem Prinzip vom Minimum der potentiellen Energie. Zum Verständnis und zur gezielten Anwendung bei Strukturoptimierungsfragen wird der Ablauf bei Anwendung der Methode im Folgenden näher beschrieben.

4.2.2 Das Scheibenproblem

Im Schiffbau kommen flächenhafte Tragstrukturen sehr häufig vor. Auch der erste Schritt zur Umsetzung der Topologieoptimierung in die schiffbauliche Umgebung erfolgt an einem flächenhaften Bauteil, der Bodenwange. Daher wird für die dabei vorkommenden Elemente an dieser Stelle die Strukturanalyse mit der FEM (theoretisch) untersucht.

Mechanisch gesehen ist die Scheibe die Erweiterung des Stabes auf zwei Dimensionen. Äußere Lasten greifen bei diesem ebenen Flächentragwerk in Richtung der Mittelebene an. Damit die Tragwirkung des ebenen Spannungszustandes erfüllt ist, werden folgende Annahmen gemacht:

- Die Dicke t der Scheibe ist klein gegenüber den übrigen Abmessungen.
- Das HOOKEsche Gesetz mit linear elastischem Werkstoffverhalten findet Anwendung.
- Verschiebungen, Dehnungen und Spannungen werden als konstant über die Scheibendicke angenommen, es existieren die Normalspannungen und die Schubspannung

$$\sigma_x(x, y), \sigma_y(x, y), \tau_{(x, y)} \quad (4.1)$$

- Die Verformungen sind klein gegenüber den Scheibenabmessungen (nur Linear-glieder \rightarrow lineare Theorie).

Daraus leiten sich die wichtigsten Parameter für die Scheibe in Form der sogenannten Mastergrößen ab:

- Der Vektor \mathbf{u} beschreibt die Verformungen bzw. Verschiebungen eines Scheibenelementes

$$\mathbf{u}(x, y) = \begin{bmatrix} u(x, y) \\ v(x, y) \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

- Die Verzerrungen bilden die erste Ableitung der Verformung, d.h. aus dem Gradienten des Verschiebungsfeldes (\mathbf{L} bzw. ∇) resultiert die Verzerrungsmatrix $\boldsymbol{\epsilon}$.

$$\mathbf{E} = \mathbf{L} \mathbf{u} = \nabla \begin{bmatrix} u_x \\ u_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \epsilon_{xx} & \epsilon_{xy} \\ \epsilon_{xy} & \epsilon_{yy} \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

- Die Spannung $\boldsymbol{\sigma}$ berechnet sich mit Hilfe des Materialgesetzes aus Elastizität und Verzerrungen.

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{C} \boldsymbol{\epsilon} \quad (4.4)$$

Die Stoffmatrix \mathbf{C} lässt sich auch ausführlich darstellen:

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{C} \boldsymbol{\epsilon} = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

In Erweiterung der linearen Stabtheorie gelten weiterhin die vereinfachten

Gleichgewichtsbedingungen, Verträglichkeitsbedingungen sowie das HOOKEsche Gesetz.

- Die kinematische Beziehung lautet mit Hilfe des Differentialoperators \mathbf{L} bzw. approximierter Dehnungen \mathbf{d} und der Dehnungsmatrix \mathbf{B} :

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{L} \mathbf{u} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \mathbf{B} \mathbf{d} \quad (4.6)$$

- Die Gleichgewichtsbedingung für Scheiben beschreibt den Zusammenhang von inneren an das Volumen gekoppelten Kräften \mathbf{p} sowie den Spannungskomponenten.

$$\mathbf{L} \boldsymbol{\sigma} + \mathbf{p} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & \frac{\partial}{\partial y} \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

Für die zwei unbekannten Verschiebungen \mathbf{u} , vgl. Formel 4.2, erhält man demnach zwei gekoppelte Differentialgleichungen. Ohne weitere ausführliche Herleitung kann mit dem LAPLACE-Operator Δ sowie der Einführung der übergeordneten AIRYSchen Spannungsfunktion F dieses Scheibenproblem auf eine einzige zusammenhängende (Scheiben-)Differentialgleichung vierter Ordnung (Bipotentialgleichung) zurückgeführt werden, die die Gleichgewichtsbedingung identisch erfüllt.

$$\frac{\partial^4 F}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 F}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 F}{\partial y^4} = \Delta \Delta F = 0 \quad (4.8)$$

Die lineare Stabtheorie bezeichnet man als Randwertproblem, da es aus einer Differentialgleichung und Randbedingungen besteht. Analytische Lösungen sind dabei nur für wenige Fälle möglich. Im Allgemeinen werden numerische Verfahren wie die FEM verwendet. Diese beruht auf einer Aufteilung des physikalischen Gebietes in finite Elemente.

Gebietszerlegung

Die Definition von Parametern wie Geometriekennwerten, Materialkennwerten und Randbedingungen („wesentliche“ Lagerungen, „natürliche“ äußere Belastungen) beschreiben das physikalische System. Das gesuchte Verschiebungsfeld \mathbf{u} des Systems wird elementweise mit relativ einfachen Ansatzfunktionen beschrieben. Die Aufteilung des Rechengebietes führt dazu, dass es nun als Unbekannte lediglich die Knotenverschiebungen \hat{u}_i bzw. \mathbf{d} und keine ganze Funktion $\mathbf{u}(x, y)$ mehr gibt.

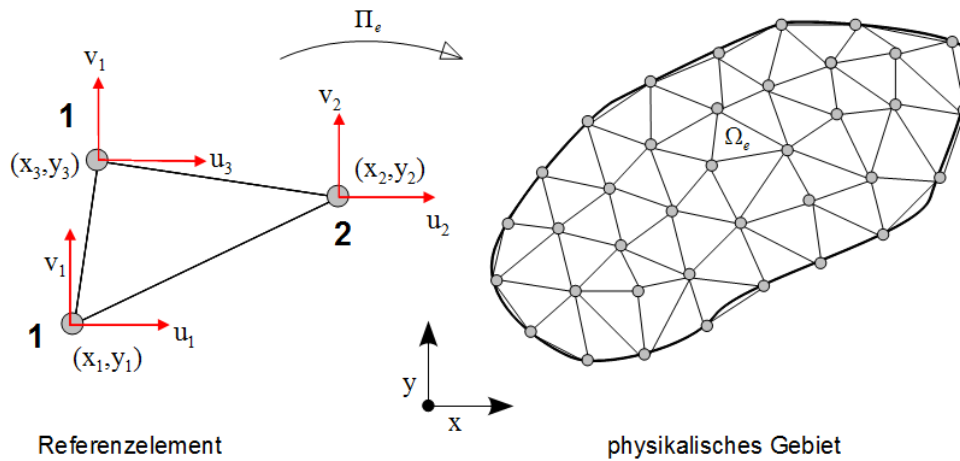


Abbildung 4.3: Aufteilung eines Körpers mit Dreieckselementen (T3 bzw. CST) als Referenzelement

Abbildung 4.3 verdeutlicht diesen Zusammenhang mit einem CST-Element (Constant-Strain-Triangle) zur Gebietsaufteilung. Diese Elementformulierung wird im Weiteren verwendet.

Verschiebungsfeldlösung, Elementsteifigkeit und rechte Seite

Nach erfolgter Zerlegung beruht die Numerik auf dem elementweisen Lösen des Verschiebungsfeldes mit einfachen Ansatzfunktionen in Form von Polynomansätzen. In jedem Knoten können dann die lokalen Verschiebungen η_i und ξ_j angegeben werden. Für die weitere Bearbeitung helfen Ansätze einer energetischen Formulierung z.B. von Arbeitsprinzipen. Das elastische Gesamtpotential Π der Scheibe summiert sich aus der Formänderungsarbeit und den drei Termen der äußeren Kraftanteile (Volumen-, Strecken- und Einzellast).

$$\Pi = \frac{1}{2} \int_V \boldsymbol{\varepsilon} \boldsymbol{\sigma} dV - \int_V [\hat{\mathbf{u}}]^T \hat{\mathbf{b}} dV - \int_\Gamma [\hat{\mathbf{u}}]^T \hat{\mathbf{q}} d\gamma - \mathbf{u}^T \mathbf{f} \quad (4.9)$$

Zur Entwicklung der Elementsteifigkeitsmatrix ist besonders der Anteil des inneren elastischen Potentials von Bedeutung.

$$\Pi_i = \frac{1}{2} \int_V \boldsymbol{\varepsilon} \boldsymbol{\sigma} dV \quad (4.10)$$

Die Ableitung der Steifigkeitsmatrix gelingt z.B. mit dem Prinzip der virtuellen Arbeiten [68]. Hierbei werden gedachte virtuelle Verschiebungen eingebaut. Das entstandene mechanische System ist im Gleichgewicht, wenn die gesamte verrichtete Arbeit (elastische minus äußere Arbeit) auf Grund der virtuellen Verschiebungen gerade verschwindet.

$$\delta W = 0 \Rightarrow \delta W_{el} - \delta W_a = 0 \quad (4.11)$$

Das mechanische System führt durch die Kraft \mathbf{F} eine Verschiebung auf das Verschiebungsfeld \mathbf{u} aus. Deren Produkt entspricht somit dieser äußeren Belastung:

$$W_a = \mathbf{f} \delta \mathbf{u} \quad (4.12)$$

Die Arbeit der äußeren Belastung muss gleich der Arbeit der Spannungen an den virtuellen Verzerrungen (innere Formänderungsenergie in jedem Element) sein.

$$W_i = \int_{\Omega_e} \boldsymbol{\sigma}^T \delta \boldsymbol{\varepsilon} d\Omega_e \quad (4.13)$$

Die äußeren Verschiebungen \mathbf{u} der Scheibenelemente werden interpoliert aus den Knotenverschiebungen \mathbf{d} mittels Formfunktionen N (lineares Element bedeutet dann auch lineare Formfunktion) als vereinfachten Verschiebungsansatz:

$$\begin{Bmatrix} u_x \\ u_y \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & N_2 & 0 & \dots \\ 0 & N_1 & 0 & N_2 & \dots \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d_{1x} \\ d_{1y} \\ d_{2x} \\ d_{2y} \\ \vdots \end{Bmatrix} = \mathbf{N} \mathbf{d} \quad (4.14)$$

Durch Einführung einer Dehnungsmatrix \mathbf{B} , Auflösen des enthaltenen Dehnungsoperators Δ und Einsetzen ins Stoffgesetz entsteht schließlich der verallgemeinerte Zusammenhang zur Steifigkeitsmatrix innerhalb des Gleichgewichts:

$$\begin{aligned} \mathbf{B} &= \mathbf{C} \mathbf{N} \\ \delta W &= \mathbf{F} \cdot \delta \mathbf{u} - t \int_{\Delta_e} \mathbf{B}^T \mathbf{u} \mathbf{C} \mathbf{B} \delta \mathbf{u} d\Omega_e = 0 \end{aligned} \quad (4.15)$$

Mit der vereinfachten virtuellen Verschiebung folgt das wichtige lineare Gesamtgleichungssystem als schwache Form (weil partielle Integration) der Arbeitsgleichung:

$$\mathbf{K} \cdot \mathbf{u} = \mathbf{F} \quad (4.16)$$

mit der Steifigkeitsmatrix für Scheibenelemente (ebener Spannungszustand) nur über die Flächenanteile integriert:

$$\mathbf{K} = t \left[\int_A \mathbf{B}^T \mathbf{C} \mathbf{B} dx dy \right] \quad (4.17)$$

Die rechte Seite für ein einzelnes Element besteht wiederum aus Anteilen des Gebietes Ω und des Randes Γ :

$$\mathbf{F} = \int_{\Omega} \mathbf{N} \mathbf{f} d\Omega + \int_{\Gamma} \mathbf{N} \mathbf{f} \hat{\sigma} d\Gamma \quad (4.18)$$

Mit den sechs Freiheitsgraden eines linearen Dreieckselementes (zwei an jedem Knoten), besitzt die globale Steifigkeitsmatrix das Format $[2n \times 2n]$.

Diskretisierung und Primärlösung

Für die Gesamtlösung der Steifigkeitsmatrix kommt im Falle der hier präferierten CST-

und Q4-Elemente das Konzept des isoparametrischen Mapping zur Anwendung. Dabei werden für die Knotenverschiebungen u und v lineare Interpolationen angenommen:

$$\begin{aligned} u &\approx N_1 u_1 + N_2 u_2 + N_3 u_3 \\ v &\approx N_1 v_1 + N_2 v_2 + N_3 v_3 \end{aligned} \quad (4.19)$$

Mit der Einführung von N in Gleichung (4.14) können die Formfunktionen an den lokalen Punkten wie folgt ausgedrückt werden. Für die Übersichtlichkeit wird das CST-Element durch Kollabieren (am Knoten 3) des entsprechenden 4-Knoten-Elementes ausgedrückt:

$$\begin{aligned} N_1(\xi, \eta) &= \frac{1}{4}(1+\xi)(1+\eta) \\ N_2(\xi, \eta) &= \frac{1}{4}(1-\xi)(1+\eta) \\ N_3(\xi, \eta) &= \frac{1}{2}(1-\eta) \end{aligned} \quad (4.20)$$

Das Ziel ist es, die Elemente von lokalen Koordinaten auf ein globales System zu mappen. Dafür werden natürliche Koordinaten eingeführt, Skizze 4.4 links

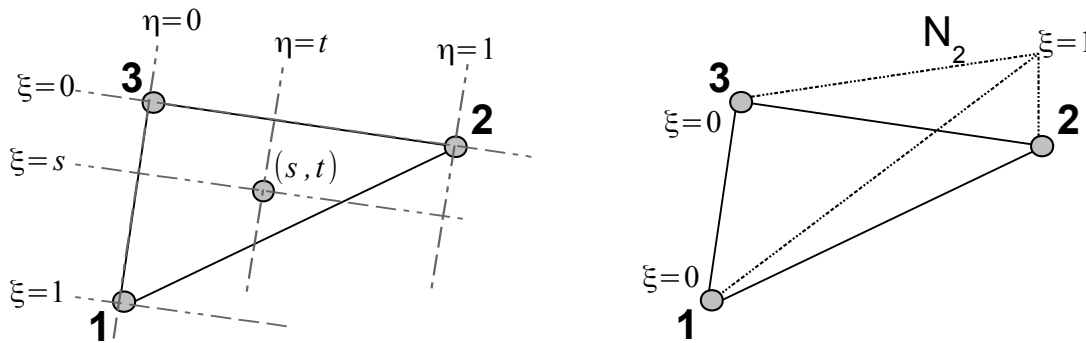


Abbildung 4.4: Natürliche Koordinaten und Formfunktion am Punkt 2 für das CST-Element

Nun können die Formfunktionen an den Knoten vereinfacht ausgedrückt werden. Dabei genügen diese am jeweiligen Knoten den Wert 1 und an den verbleibenden den Wert 0 an, Skizze 4.4 rechts. Die Beziehung

$$\begin{aligned} x &= \sum_i N_i(\xi, \eta) x_i \\ y &= \sum_i N_i(\xi, \eta) y_i \end{aligned} \quad (4.21)$$

beschreibt nun das Mapping vom lokalen auf das globale Koordinatensystem und ist im Wesen des isoparametrischen Konzepts bzw. Mapping. Für eine Transformation der Ableitungen wird die JACOBI-Matrix benötigt, die aus der Anwendung der Kettenregel (für vorige Gleichung) hervorgeht:

$$\begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial \xi} \\ \frac{\partial u}{\partial \eta} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \xi} & \frac{\partial y}{\partial \xi} \\ \frac{\partial x}{\partial \eta} & \frac{\partial y}{\partial \eta} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial u}{\partial y} \end{Bmatrix} = \mathbf{J} \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial u}{\partial y} \end{Bmatrix} \quad (4.22)$$

Nun kann dies auf die Dehnungsmatrix nach (4.15) angewendet werden.

$$\mathbf{B} = \mathbf{C} \mathbf{N} = \begin{bmatrix} \frac{dN_1}{dx} & \frac{dN_2}{dx} & \frac{dN_3}{dx} \end{bmatrix} = \frac{1}{J} \begin{bmatrix} \frac{dN_1}{d\xi} & \frac{dN_2}{d\xi} & \frac{dN_3}{d\xi} \end{bmatrix} \quad (4.23)$$

Die Steifigkeitsmatrix ist so durch Transformation auf ξ und η mit GAUSS-Quadratur lösbar und ist gemeinsam gültig für die linearen Elemente CST und Q4:

$$\int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \mathbf{B}^T \mathbf{C} \mathbf{B} \det(\mathbf{J}) h d\xi d\eta \quad (4.24)$$

Zuallermeist hat man es aber mit einer großen Anzahl von finiten Elementen zu tun. Die Lösung der assemblierten globalen Steifigkeitsmatrix und damit eines sehr großen linearen Gleichungssystem ist nicht trivial. Zur numerischen Integration stehen direkte und iterative Lösungsmethoden zur Verfügung. Ein Standardverfahren ist die GAUSS'sche Quadratur. Es ist so formuliert, dass Polynome integriert werden, indem an ausgewählten Stützstellen ξ_i Funktionswerte berechnet werden, mit Gewichten w_i multipliziert, und dann addiert werden:

$$\int_{-1}^1 f(\xi) d\xi = \sum_{i=1}^m w_i f(\xi_i) \quad (4.25)$$

Auch die zweidimensionalen Integrationen der betrachteten Scheibenelemente (4.24) lassen sich analog durch mehrfache Summenbildung ermitteln:

$$\int_{-1}^1 \int_{-1}^1 f(\xi, \eta) d\xi d\eta = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m w_i w_j f(\xi_i, \eta_j) \quad (4.26)$$

Bei den indirekten sei vor allem das JACOBI-Verfahren sowie das Gradientenverfahren genannt. Allen gemeinsam ist die Ausnutzung der speziellen Eigenschaften Symmetrie und Positiv-Definitheit der Steifigkeitsmatrix. Damit führt eine \mathbf{LDL}^T -Zerlegung (CHOLESKY-Verfahren) schnell zum Ziel:

$$\mathbf{K} = \mathbf{L} \mathbf{D} \mathbf{L}^T \quad (4.27)$$

Es sind \mathbf{D} eine Matrix nur mit Diagonalelementen und \mathbf{L} eine untere Dreiecksmatrix mit Belegung von eins auf der Hauptdiagonalen. Die Lösung des Gleichungssystems kann nun, bekannte Zerlegung vorausgesetzt, durch Vorwärts- und Rückwärtssubstitution erfolgen. Diese Art der Faktorisierung bietet vor allem für die Rechnerimplementierung Vorteile.

Nachlaufrechnung

Die Ermittlung der Verschiebungen nach (4.16) werden Primärergebnisse genannt.

Dehnungen und Spannungen werden erst in der Nachlaufrechnung ermittelt. Aufgrund der differentiellen Abhängigkeit nach 4.28 bezeichnet man sie als Sekundärlösungen.

$$\begin{aligned}\epsilon &= B d \\ \sigma &= C \epsilon\end{aligned}\tag{4.28}$$

Für den übergeordneten Topologieoptimierungsprozess sind diese Ergebnisse aber nicht notwendig. Der Algorithmus bezieht aus dem Simulationsmodell die Verschiebungen, da das Optimierungsziel die Minimierung der Nachgiebigkeit ist.

Die bisher besprochenen Elemente zeichnen sich durch einen linearen Verschiebungsansatz aus. Daraus resultiert eine konstante Spannung im Element. Sprünge treten an den Grenzen der Elemente auf. Dabei gilt es im Hinblick auf eigene Programmierarbeiten zu beachten, dass kommerzielle Programmpakete dies oft beschönigen, wenn sie im Plot ein ausgewogenes Spannungsbild erzeugen. Meist werden hier intern Wichtungen und Mittelwertbildung in Knotengrenzen vorgenommen.

Im Falle der betrachteten 2D Scheiben enthält der Spannungsvektor die Komponenten σ_x , σ_y und τ_{xy} .

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} \\ \tau_{xy} & \sigma_y \end{bmatrix}\tag{4.29}$$

Daraus lässt sich sodann den für die Festigkeitsbewertung wichtiger Wert der Vergleichsspannung nach VON MISES für das gewählte Koordinatensystem ableiten:

$$\sigma_{V(e)} = \sqrt{(\sigma_x + \sigma_y)^2 - 3(\sigma_x \sigma_y - \tau_{xy}^2)}\tag{4.30}$$

4.2.3 Zusammenfassender Ablauf der Berechnung

Für die praktische Umsetzung aus den Herleitungen der entsprechenden Gleichungen folgen zwei Möglichkeiten der Herangehensweise bei der finite Elemente Analyse (FEA)

- a) aus Sicht des Anwenders vordergründig kommerzieller FEM-Programmpakete und
- b) theoretisch methodisch aus Sicht des Entwicklers.

Beim praktischen Anwender kommerzieller Pakete überwiegt das schrittweise Denken (Preprocessing, Processing, Postprocessing) wohingegen der theoretisch und methodisch orientierte Entwickler eingehender verschiedene Entwicklungsebenen differenziert, so die Strukturebene mit den Systemgleichungen, die Elementebene mit den finiten Elementen sowie die Materialpunktebene mit den anzusetzenden Materialgesetzen. Der Gesamtablauf einer typischen Strukturanalyse mit der FEM entspricht sowohl in der Reihenfolge als auch in der Qualität (also beiden Sichtweisen), folgendem Schema:

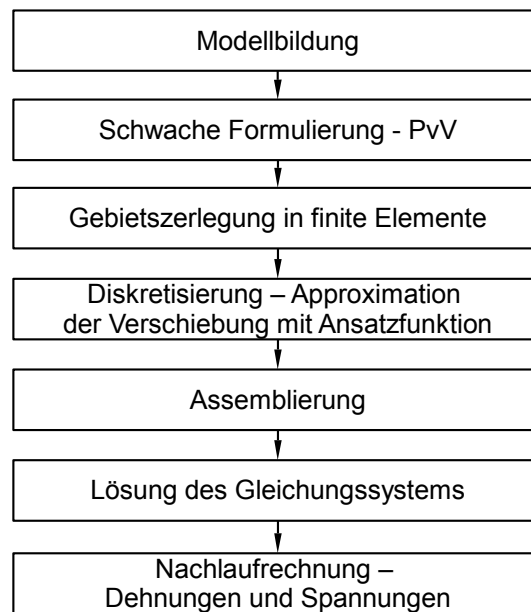


Abbildung 4.5: Ablaufschema für die finite Elemente Analyse

4.3 Optimierungsmodell

Die in Abschnitt 2.2 bereits vorgestellten Typen der Strukturoptimierung stellen das Optimierungsmodell dar. Aus der Verschiedenartigkeit der Zielfunktion lässt sich aber auch eine mathematische Klassifikation vornehmen. Probleme mit mehreren gleichberechtigten und gleichzeitig vorhandenen Zielfunktionen sind so genannte Multikriterien- oder auch Pareto-Optimierungsmethoden. Da sie immer zu Kompromisslösungen führen, sind sie besonders für stochastische Verfahren geeignet. Beim Untersuchungsschwerpunkt dieser Arbeit, der Topologieoptimierung mit einer Zielfunktion, spielen diese aber nur eine untergeordnete Rolle und werden daher auch nicht weiter diskutiert.

4.3.1 Modell der materiellen Topologieoptimierung

Wenngleich der Formoptimierung sehr ähnlich, ist nur die Klasse der Topologieoptimierung in der Lage einen neuartigen strukturellen Aufbau des Tragwerkes zu ermöglichen. Dabei geht es darum, in einem vorgegebenen Bauraum sowie unter Beachtung von Randbedingungen, das zur Verfügung gestellte Material optimal zu verteilen. Diese Eigenschaft bzw. Fähigkeit macht die Topologieoptimierung auch für die Zielfindung dieser Arbeit so interessant. Für den schiffbaulichen Konstruktionsprozess meint das, die im Ergebnis Topologieoptimierung vorliegenden abgeleiteten Lastpfade als Werkzeug für die gezielte qualitative Verbesserung bei gleichzeitiger Zeitersparnis einzusetzen. Wie bereits in Abbildung 2.1 dargestellt, liefert die Anwendung der Topologieoptimierung das prinzipielle und rein strukturelle Layout der Gesamtstruktur. Am

Anfang der Entwicklung unterschied man dabei zwischen geometrischen und materiellen Ansätzen. Probleme infolge der Formulierung der gewollten Veränderung im mechanischen System ließen die Weiterentwicklung geometrischer Ansätze in den Hintergrund treten [136]. Im Folgenden wird daher das materielle Verfahren näher betrachtet. Um dieses mit Hilfe der FEM nutzen zu können, wird jedem finiten Element ein spezifischer E-Modul zugewiesen. Ist der E-Modul sehr klein, hat das Element eine sehr geringe Steifigkeit und es verhält sich quasi wie ein Loch. Wird auf das Element der E-Modul des Bauteilmaterials referenziert, so verhält sich das Element wie ein Festkörper. Um eine schlecht konditionierte Steifigkeitsmatrix und numerische Probleme zu vermeiden, darf der E-Modul aber nie den Wert null erreichen.

Als Optimierungsalgorithmen für die Topologieoptimierung stehen wiederum die beiden Klassen nach Abschnitt 4.4 zur Verfügung. Ein wichtiger Vertreter der Optimalitätskriterien ist dabei die Soft Kill Option (SKO). Es nutzt die adaptive biologische Wachstumsregel nach MATTHECK [86] und liefert im Ergebnis Strukturen mit homogener Oberflächenspannung.

Bei der „mathematischen“ Topologieoptimierung wird der elementspezifische E-Modul durch eine normierte Dichte gesteuert. Die Dichte eines Elementes, wird im isotropen Fall über eine und im orthotropen Fall über mehrere Designvariablen verändert. Zur Behandlung von Topologieoptimierungsproblemen mit Methoden der mathematischen Programmierung sind mehrere wichtige Methoden zur funktionalen Verknüpfung von E-Modul und Dichte entwickelt. Die *Homogenisierungsmethode* füllt den Designraum mit orthotropen Material auf um den Zusammenhang herzustellen. Der *SIMP*-Ansatz verwendet hingegen isotropes Material um die Beziehung zwischen Elastizitätsmodul und Werkstoffdichte zu ermitteln.

Parametrisierung in der Topologieoptimierung

Bei der Topologieoptimierung wird eine vorgegebene Menge Material im Konstruktionsraum so verteilt, dass eine Topologie gefunden wird, die für bestimmte Randbedingungen und Lasten den Optimalitätskriterien entspricht. Diese Verteilung muss auf ein Analysemodell abgebildet werden. Ein FEM-Modell (mit festem FEM-Netz) bildet die Basis einer netzabhängigen Parametrisierung. Die Anzahl der Designvariablen s der Zielfunktion gleicht damit derjenigen der finiten Elemente und es gibt nur diskrete Werte „leer“ und „füllig“. So werden topologische Designlösungen des Systems beschrieben. Für die Modellparametrisierung innerhalb der Topologieoptimierung stehen dafür mehrere Ansätze zur Verfügung. Die für diese Arbeit wichtigsten sind die bereits genannten Methoden zur Verknüpfung von E-Modul und Dichte. Der Ansatz besteht darin, dass die Materialdichte jedes einzelnen Elements entweder den Wert 0 oder 1 annimmt, „füllig“ und „leere“ Elemente entstehen. Die charakterisierende Funktion lautet:

$$\chi(\mathbf{x}) = \begin{cases} 1 & ; \mathbf{x} \in \Omega^{Mat} & : \text{Vollmaterial} \\ 0 & ; \mathbf{x} \in \Omega & : \text{kein Material} \end{cases} \quad 0 \leq \chi \leq 1 \quad (4.31)$$

Um die eingeführten Optimierungsalgorithmen anwenden zu können, muss diese (diskrete) Parameterfunktion weiterhin in eine kontinuierliche Aufgabe überführt werden. So werden Aussagen darüber erzielt, welche Elemente des Designbereiches gemeinsam die optimale Struktur bilden. Gleichzeitig gilt es, alle anderen Elemente herauszufiltern. BENDSØE [13] spricht von einer „Schwarz-Weiß-Verteilung“. Weitergehende ausführliche Diskussionen verschiedenster andersartiger Werkstoffmodelle der Topologieoptimierung werden in MAUTE [89] oder ESCHENAUER [35] vorgenommen.

Homogenisierungsmethode

Die E-Modul-Dichte-Relation wird bei diesem Verfahren über die Homogenisierung einer periodischen Mikrostruktur erreicht. Die Mikrostruktur besteht dabei aus einzelnen Elementen, die zu einem Teil mit Material gefüllt sind, zum anderen Teil leer sind. Es entstehen orthotrope Eigenschaften eines Elementes bzw. einer Basiszelle, die sich grafisch über ein in ihr eingebrachtes rechteckiges Loch beschreiben lassen.

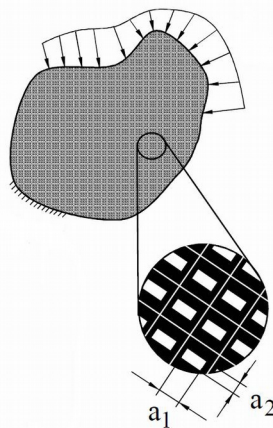


Abbildung 4.6: Beispiel einer Mikrostruktur mit Basiszellen

Die Abmessungen der Löcher a_1 und a_2 aus Abbildung 4.6 und der Orientierungswinkel der Aussparung Θ , werden festgelegt. Es wird nun versucht eine globale Materialeigenschaft abzuleiten die von der Form und Ausrichtung der einzelnen Zellen abhängig ist. Dabei hilft die Vorstellung, dass die mikroskopische Struktur aufgrund der Aneinanderreihung von Material und Loch einer gewissen Periodizität unterworfen ist. Eine physikalische Materialeigenschaft Φ ist dabei abhängig von einem makroskopischen Maßstab \vec{x} und einem mikroskopischen Maßstab \vec{y} . Der Vektor $\vec{y}^T = (y_1, y_2, y_3)$ beschreibt die Perioden in den einzelnen Koordinatenrichtungen und muss klein gegenüber \vec{x} sein. Daraus folgt, dass die physikalische Materialeigenschaft $\Phi(\vec{x}, \vec{y})$ auf makroskopischer Ebene oszilliert

oder schwankt. Aufgabe der Homogenisierungsmethode ist es diese Oszillationen zu mitteln und das globale Systemverhalten mit der homogenisierten physikalischen Eigenschaft Φ^h zu beschreiben. In der Regel stellt dies den zu homogenisierenden E-Modul einer Mikrostruktur dar.

Die Finite-Elemente-Methode wird in der Praxis für die Homogenisierung einer Mikrostruktur eingesetzt. Dazu werden die Koeffizienten des Elastizitätstensors C durch geeignete Funktionen interpoliert. Wie bereits gezeigt, ist im zweidimensionalen Fall jedes Element von 3 Entwurfsvariablen a_1 , a_2 und Θ abhängig. Da die Dichte jedes Elements nur von a_1 und a_2 abhängig ist:

$$\rho(a_1, a_2) = (1 - a_1 a_2) \rho^0 \quad (4.32)$$

werden die Koeffizienten C_{ij} zuerst nur als Funktion von a_1 und a_2 approximiert wobei $\Theta=0$ bleibt:

$$\rho(a_1, a_2, \Theta) = T^T(a_1, a_2, \Theta) C(a_1, a_2) T(\Theta) \quad (4.33)$$

Die Winkelabhängigkeit wird in einem zweiten Schritt mit einer Transformationsmatrix realisiert:

$$T(\Theta) = \begin{vmatrix} \cos^2 \Theta & \sin^2 \Theta & \cos \Theta \sin \Theta \\ \sin^2 \Theta & \cos^2 \Theta & -\cos \Theta \sin \Theta \\ -2\cos \Theta \sin \Theta & 2\cos \Theta \sin \Theta & \cos^2 \Theta - \sin^2 \Theta \end{vmatrix} \quad (4.34)$$

Analog dazu wird im dreidimensionalen Fall verfahren, hier steigt jedoch die Zahl der Entwurfsvariablen zur Beschreibung der Größe und Lage der Löcher.

SIMP-Ansatz

Bei der Homogenisierungsmethode werden durch die Winkelabhängigkeit der Aussparungen orthotrope Materialeigenschaften berücksichtigt. Das Ergebnis dieser Optimierung ist also ein stark orthotropes Material im mikroskopischen Bereich. Diese Ergebnisse lassen sich schlecht auf reale Bauteile übertragen. Normalerweise ist nur die Verteilung und nicht die Ausrichtung des Materials von Interesse. Also wird ein isotropes Material für die Topologieoptimierung zugrunde gelegt. Der *SIMP-Ansatz* (Solid Isotropic Material with Penalization bzw. Power Law Method) nach BENDSØE [12] verfolgt diese Grundidee. Vorteil bei diesem Verfahren ist, dass für jedes finite Element i mit der Dichte ρ nur eine Designvariable s_i festgelegt werden muss. Die Dichte wird zunächst normiert und über die Designvariable in Relation zu dem normierten E-Modul des Elements gesetzt:

$$\frac{\rho_i}{\rho_i^0} = s_i \quad (4.35)$$

Die Variablen ρ_i^0 und E^0 stehen für die Dichte und den E-Modul des voll ausgefüllten Elements, ohne Loch. Um beim Optimierungsalgorithmus, trotz kontinuierlicher Variation

der möglichen Dichte, eine möglichst eindeutige Schwarz-Weiß-Verteilung, also Tendenzen zu entweder 0 oder 1, zu erzwingen, wird noch ein Strafexponent eingeführt, der Materialsteifigkeitstensor \mathbf{E}_i lässt sich damit wie folgt ausdrücken:

$$\left(\frac{\rho_i(x)}{\rho_0(x)} \right)^p = \frac{E_i^{eff}}{E_i^0} \quad \text{bzw.} \quad \mathbf{E}^{eff} = \mathbf{E}^0 s_i^p \quad (4.36)$$

Für $p \geq 1$ vereinfacht dies die Interpretation der Topologieoptimierung, denn bei zunehmendem Exponenten wird ein 0-1 Entwurf begünstigt und Dichten, die im Bereich dazwischen liegen, werden zunehmend bestraft, vergleiche Abbildung 4.7:

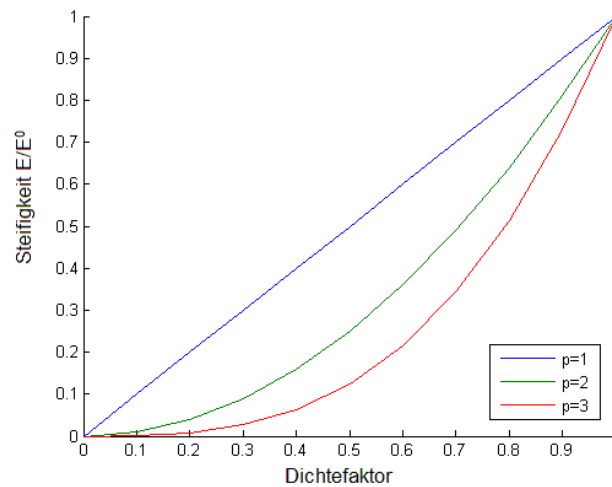


Abbildung 4.7: Einfluss des Bestrafungsexponenten auf die Elementsteifigkeit in Abhängigkeit der Dichte

Während eines Optimierungsruns wird der Bestrafungsexponent im Normalfall schrittweise erhöht. Dabei ist zu beachten, dass bei zu großer Wahl auch eigentlich konvexe Probleme, wie z.B. die Maximierung der mittleren Steifigkeit einer Struktur, nichtkonvex werden können und die Suche nach einem globalen Maximum eingeschränkt ist. Daher schlagen BENDSØE und SIGMUND [16] vor, den Exponenten in Abhängigkeit der Querkontraktion zu beschränken, z.B. für den zweidimensionalen Fall:

$$p \geq \max \left\{ \frac{2}{1-\nu}, \frac{4}{1+\nu} \right\} \quad (4.37)$$

Für ein Material mit einer Querkontraktion von $\nu=1/3$ ergibt sich demnach $p=3$. Dieser Wert hat sich praktisch in den letzten Jahren vielfach bewährt.

Zielfunktion und Nebenbedingung der Topologieoptimierung

Zielfunktion

Bei der üblichen Anwendung von Optimierungsalgorithmen gilt es immer eine Zielfunktion zu minimieren. Die diskretisierte Formulierung lautet:

$$f(\boldsymbol{\rho}) \mid \Omega^{Mat} = \sum_{i=1}^{n_{El}} \rho_i v_i \leq \Omega, \quad 0 \leq \rho_i \leq 1 \quad (4.38)$$

Die Zielfunktion f ist dabei eine Funktion der Gesamtdichteverteilung mit der vorgegebenen Materialmenge als Summe der Produkte aus Elementdichte und Elementvolumen. Das eigentliche Ziel der Topologieoptimierung ist hingegen meist die maximale Steifigkeit der Gesamtstruktur (Designraum Ω) bei vorgegebener Materialmenge Ω^{Mat} sowie vorgegebener geometrischer Lagerungen (Randbedingungen Γ_D) und äußerer Belastung (natürlicher Randbedingungen Γ_N).

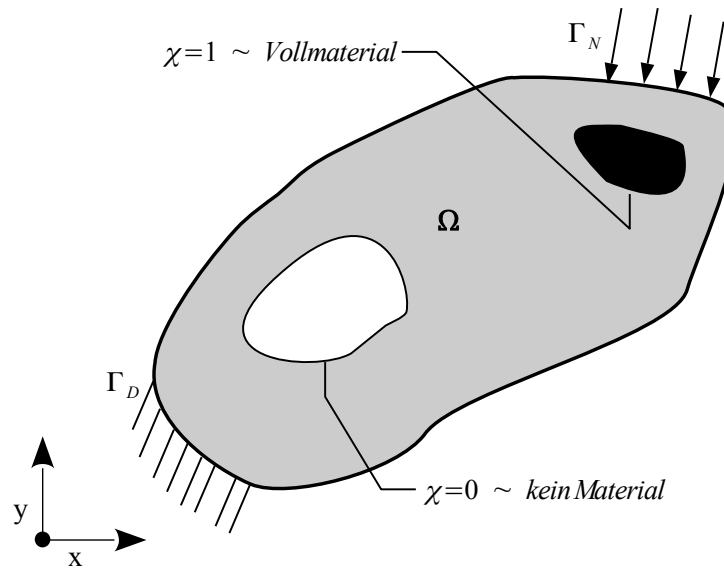


Abbildung : Schema des Entwurfsraumes bzw. Bauraumes zur Veranschaulichung der Compliance bei aufgetragenen Kräften und Lagerung

Das Ziel maximaler Struktursteifigkeit lässt sich dabei zusammenführen über einen reziproken Zusammenhang, da es gleichbedeutend ist mit minimaler globaler Nachgiebigkeit bzw. Compliance C . Allgemein gilt für die verrichtete Arbeit der inneren Kräfte pro Volumeneinheit, die sogenannte Formänderungsenergie elastischer Verformungen. Die Arbeit die die Spannungen auf den von ihnen ausgelösten Dehnungen leisten ist bereits in 4.2 hergeleitet (Gleichung 4.10) und wird hier nunmehr wiederholt:

$$\Pi_i = W^{int} = \frac{1}{2} \int_V \boldsymbol{\sigma}^T \boldsymbol{\varepsilon} dV \quad (4.39)$$

Veranschaulichen lässt sich diese verrichtete Arbeit als Flächeninhalt der sich ergebenden Dreiecksfläche beim (elastischen) Spannungs-Dehnungs-Diagramm.

Das verallgemeinerte Werkstoffgesetz entsprechend Gleichung 4.4

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{C} \mathbf{E} \quad (4.40)$$

eingesetzt, führt direkt auf eine mögliche Formulierung der Zielfunktion in Abhängigkeit der diskreten Elemente x und der kontinuierlichen elementweisen Dichteverteilung:

$$f(x, \rho) = \frac{1}{2} \int_{\Omega} \boldsymbol{\varepsilon}^T(x) \mathbf{C}(x, \rho) \boldsymbol{\varepsilon}(x) d\Omega \quad (4.41)$$

Analog dazu kann man auch mit der äußeren Arbeit die Zielfunktion formulieren. Diese wird durch das skalare Produkt des Vektors der angreifenden äußeren Kräfte \mathbf{f} und der diskreten Verschiebungen \mathbf{d} ausgedrückt:

$$\min: C = W = \mathbf{d}^T \mathbf{f} \quad (4.42)$$

Damit wird dann auch direkt der Zusammenhang mit der vorgeschalteten finite Elemente Analyse sichtbar, da hierin die Werte für die knotenweise Verschiebung ermittelt werden:

$$\mathbf{K} \mathbf{d} = \mathbf{f} \quad (4.43)$$

In den Iterationsschritten der Optimierung bleibt dabei der Kraftvektor konstant, die diskrete Verschiebung hingegen ist abhängige veränderliche Größe der Designvariablen. Die globale Steifigkeitsmatrix setzt sich in diesem Falle zusammen aus der Summe der Steifigkeitsmatrizen der einzelnen Elemente:

$$\mathbf{K} = \sum_{i=1}^{N_{el}} K_{El}(E_{El}) \quad (4.44)$$

Bezieht man die Abhängigkeit von der Dichteverteilung nach (4.38) mit ein, zeigt sich der Einfluss des Bestrafungsfaktors bei Verwendung der SIMP-Methode:

$$\mathbf{K}(\rho) = \sum_{i=1}^N \rho_i^p \mathbf{K}_i \quad (4.45)$$

Damit lässt sich die vollständige Minimierungsaufgabe bei Anwendung der SIMP-Methode darstellen durch eine Zusammenführung von (4.42) und (4.43):

$$\min: C = c(\mathbf{s}, \rho) = \mathbf{d}^T \mathbf{K}^{-1}(\rho) \mathbf{d} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N (s_i^p) \mathbf{d}_i^T \mathbf{K}^{-1}(\rho) \mathbf{d}_i, \quad 0 \leq \rho \leq 1 \quad (4.46)$$

Nebenbedingung

Um die Struktursteifigkeit bezüglich gegebener mechanischer Randbedingungen zu maximieren, ist noch eine Vorgabe für die Materialmenge zu machen:

$$\int_{\Omega} (s_i) d\Omega = \sum_{i=1}^{N_{el}} s_i = Vol(\Omega^{mat}) \leq \Omega \quad (4.47)$$

Ohne diese Nebenbedingung würde zwangsläufig der zur Verfügung stehenden Bauraum bzw. Konstruktionsraum gänzlich gefüllt bleiben, da so die Struktursteifigkeit natürlich am höchsten ist. Die Restriktionsfunktion entspricht einer Gleichgewichtsbedingung und lautet:

$$h(s) = \int_{\Omega} (s_i) d\Omega - \Omega^{Mat} = Vol(\Omega^{Mat}) - \Omega = 0 \quad (4.48)$$

Damit lässt sich zusammenfassend mit der Definition der äußeren Arbeit schreiben:

$$\min_{s \in R^n} \{ W(s) \mid h(s) = 0 \} \quad (4.49)$$

Numerische Probleme

Im Idealfall haben die Elemente des optimierten Designraum nur Dichten von null oder eins. Man erhält direkt übertragbare Layouts, also scharfe Designs ohne Zwischenwerte. Für Probleme des allgemeinen Maschinenbaus wie z.B. Herstellung von Gussbauteilen ... ist dies wichtig. Hier sollte der Designvorschlag sehr nah an der finalen Konstruktion sein, eine reibungslose Übertragbarkeit ist wichtig. Für die im Schiffbau üblichen flächenhaften Konstruktionen und ebenen stark rasterartigen Bauweisen ist das Ziel eines solchen Designvorschlag ein etwas anderes. Es geht bei der Übertragung in die schiffbauliche Umgebung zunächst vordergründig darum, aus dem Ergebnis der Topologieoptimierung Aufschlüsse über innere Weiterleitung der schwierigen äußeren Belastungen zu erzielen. Mit den Informationen dieses Kraftpfadmanagements werden dann innerhalb der üblichen Bauweisen des Schiffbaus Konstruktionsverbesserungen vorgenommen. Dennoch sei an dieser Stelle auf mathematische und numerische Probleme beim Handling mit den Topologieoptimierungsverfahren aufmerksam gemacht. SIGMUND und PETERSSON [120] gaben schon vor längerer Zeit einen strukturierten Überblick darüber. Dabei unterscheiden sie drei Kategorien:

1. Checkerboarding

Beim sogenannten „Checkerboarding“ treten durch den Wechsel von Elementen hoher und niedriger Dichte schachbrettartige Strukturergebnisse auf.

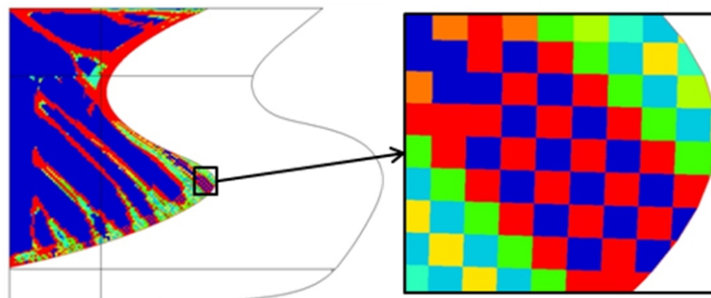


Abbildung 4.8: Beispiel für die Ausbildung von Schachbrettmustern

Numerisch liefern diese Elementkonfigurationen in Bezug auf ihr Gewicht ausgesprochen steife Strukturen und werden daher vom Algorithmus bevorzugt. In der Praxis sind diese Strukturen aber nicht sinnvoll bzw. umsetzbar. Ein oft benutzter Lösungsansatz besteht

darin, in Form eines Restriktionsfilters, die Häufung von Elementen mit hoher Dichte vorzusehen. So kann man beispielsweise fordern, dass mindestens drei benachbarte Elemente gemeinsam hohe Dichten aufweisen sollen. Der Schachbretteffekt lässt sich damit unterbinden.

2. Netzabhängigkeit

Das beschriebene Checkerboarding ist ein Netzabhängigkeitsphänomen, dass mit immer feineren Netzen lösbar wäre. Aber meist (gilt auch für die Überführung in den Schiffbau) ist man aber nicht an zu feinen Strukturen interessiert, wo „Konvergenz“ erst auf Mikrostrukturebene auftritt. Auch ist es möglich, dass mehrere Optima, also nichteindeutige Lösungen entstehen. Dafür haben sich Filter durchgesetzt, die nur schwach vom Diskretisierungsgrad abhängen. Man spricht von einer netzunabhängigen Filterung.

3. Lokale Minima

Lokale Minima resultieren aus dem Problem, dass verschiedene Lösungen bei gleicher Diskretisierung möglich sind. Bei der Topologieoptimierung treten im Verlauf der Iterationen viele lokale Minima auf. Lösbar ist das Problem durch Anwendung von Kontinuitätsmethoden. Dabei wird schrittweise das (künstlich erzeugte) konvexe Problem in das originale nichtkonvexe umgewandelt.

Weitere Informationen zu den mittlerweile oft zugeschnittenen Lösungen für die jeweiligen Probleme sind in [120], [58] oder [16] zu finden.

4.4 Optimierungsalgorithmus

Mit dem Abschluss der Modellbildung sind verschiedenste Vorschriften zur Verbesserung des Designs entwickelt. Im Gegensatz zu einer geringen Anzahl freier Parameter bei der Formoptimierung, sind bei der Topologieoptimierung oft weit mehr als 100.000 freie Parameter üblich. Der Wahl des geeigneten Algorithmus kommt so eine wichtige Rolle zu. Zuvorderst ist zwischen analytischen und numerischen Methoden zu unterscheiden. Von Bedeutung heute sind aber vor allem die letztgenannten, da vollständige analytische Beschreibungen meist nur für einfache und kleine Probleme vorhanden und anwendbar sind. Zwei Aufgaben sind Hauptbestandteile des Optimierungsalgorithmus; die Überprüfung der Designgüte mittels Abbruchkriterium sowie eine Vorschrift zum sukzessiven Verbessern des Designs. Dabei sind grundlegend zwei Gruppen numerischer Methoden entwickelt worden. Gradientenfreie Verfahren sind für die Anwendung der Topologieoptimierung unüblich. Bei den fokussierten Gradientenverfahren werden Lösungen mittels mathematischer Programmierung oder Optimalitätskriterienverfahren gesucht.

Einen Überblick geläufiger Optimierungsalgorithmen zeigt Abbildung 4.9. Sowohl Optimalitätskriterienverfahren als auch Verfahren der beweglichen Asymptoten finden

wegen ihrer Effizienz und Robustheit Anwendung und werden daher im Folgenden kurz diskutiert.

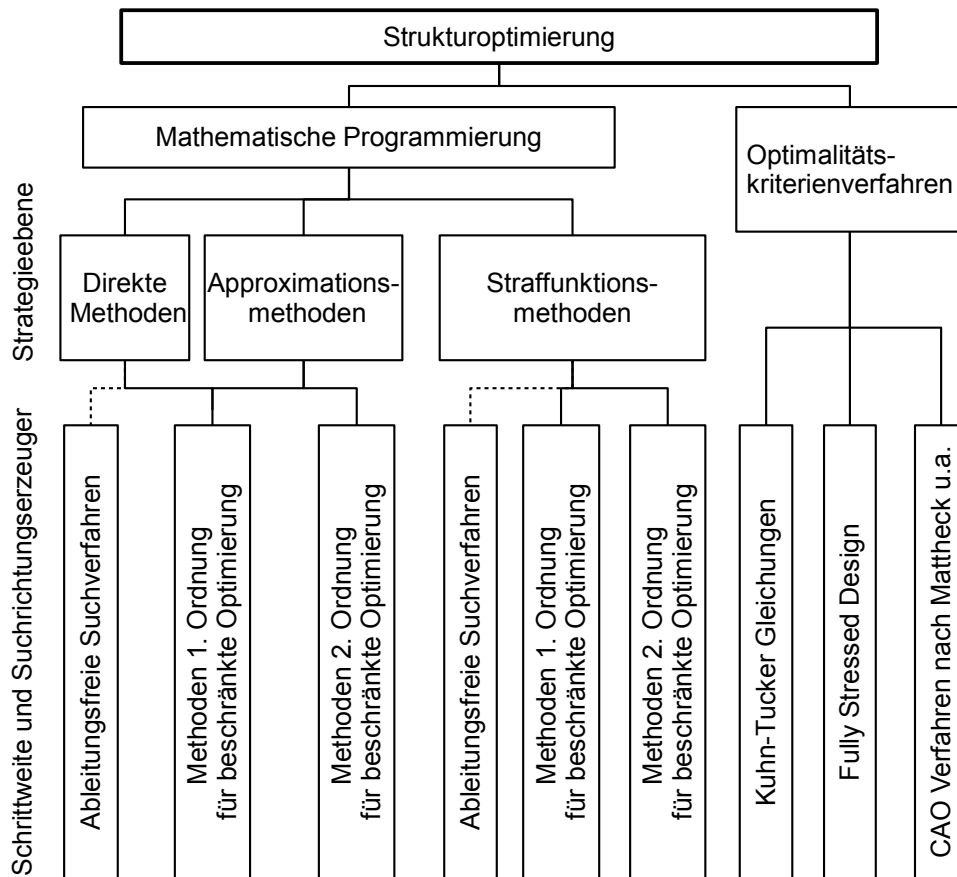


Abbildung 4.9: Überblick der Optimierungsalgorithmen nach [9]

4.4.1 Optimalitätskriterienverfahren

Zwei Hauptkomponenten bilden den Kern dieses Verfahrens, das festgelegte Optimalitätskriterium sowie die iterative Verbesserungsvorschrift. Man kann sie als indirekte Verfahren bezeichnen, da das Optimalitätskriterium, also die Prüfvorschrift, vorab festgelegt wird. Zum Teil liegt es sogar nicht als explizite Zielfunktion vor.

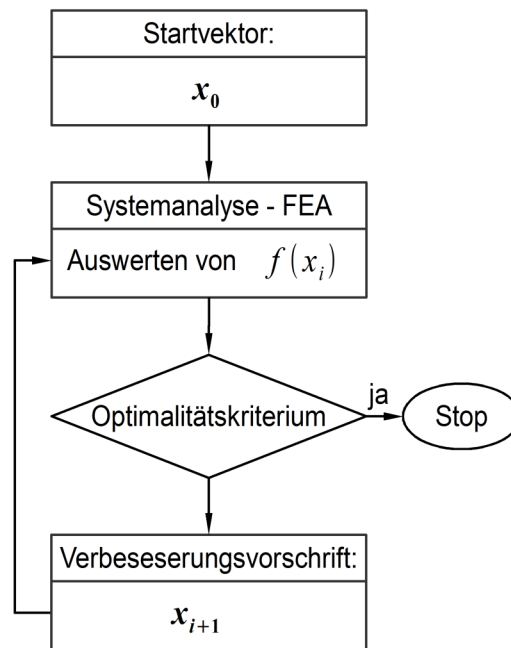


Abbildung 4.10: Routine der Strukturoptimierung mit Optimalitätskriterienverfahren

Wie Abbildung 4.10 verdeutlicht, wird die mechanische Struktur einer Analyse unterzogen und auf ein Kriterium, von dem man vermutet, dass es das Optimum darstellt, hin getestet. Das Optimalitätskriterium selbst ist oft heuristisch basiert (z.B. CAO-Methode nach MATTHECK oder das *Fully Stressed Design*), kann aber auch mathematisch hergeleitet werden (z.B. die KKT-Bedingung nach KARUSH-KUHN-TUCKER).

Nun erfolgt die iterative Veränderung ohne Suchrichtungsalgorithmus nur mit Hilfe der festgelegten Rekursionsformel:

$$\mathbf{x}^{(k+1)} = \mathbf{f}(\mathbf{x}^{(k)}) \quad (4.50)$$

Die Vorschrift zur Verbesserung kann wie das Kriterium heuristischer Natur sein aber auch mathematisch basiert sein (KKT-Bedingungen).

Diese Verfahren iterieren meist sehr schnell, auch bei hoher Anzahl von Entwurfsvariablen, führen aber nicht zwingend zu einem Optimum.

Eines der erfolgreichsten und bekanntesten Verfahren ist das *Fully Stressed Design* (FSD) [93]. Es basiert auf einer intuitiven Annahme die Ingenieure lange Jahre praktisch angewendet haben:

Das minimale Gewicht eines Tragwerkes ist dann erreicht, wenn so viele Stäbe wie möglich voll belastet sind.

Das Optimierungsziel ist das minimale Gewicht der Gesamtstruktur. Dieses Kriterium führt zu einer relativ einfachen Iterationsvorschrift. Wenn ein Querschnitt nicht voll beansprucht wird, ist Material (Querschnitt) zu reduzieren, vgl. Formel 4.51.

$$x_i^{(k+1)} = \max \left(x_i^l, x_i^{(k)} \frac{\sigma_i}{\sigma_i^{\text{zulässig}}} \right) \quad (4.51)$$

Programmiertechnisch ist dieser Ansatz sehr einfach zu implementieren, daher rückte er gerade zu Beginn der Computerära in den sechziger Jahren des vergangenen Jahrhunderts in den Fokus der Ingenieurabteilungen. Aber dieses Kriterium gilt nur bei statisch bestimmten Tragwerken, für statisch unbestimmte Tragwerke stellt die vollbeanspruchte Struktur im allgemeinen Fall nicht die gewichtsoptimale Lösung dar [58]. Trotz der oft hohen Effizienz haben Optimalitätskriterienverfahren immer den Nachteil nicht allgemein einsetzbar zu sein.

4.4.2 Methoden der mathematischen Programmierung

Verfahren der mathematischen Programmierung verwenden immer explizite Zielfunktionen als Grundlage des Auffindens globaler Minima. Durch die abstrakte mathematische Formulierung sind diese Verfahren nicht auf bestimmte Anwendungen wie etwa die Strukturoptimierung beschränkt. Eine Vielzahl von numerischen und analytischen Methoden sind für die Strukturoptimierung anwendbar und in der Literatur dokumentiert, unter anderem in [9], [34], [55], [58], [118].

Dabei wird iterativ der Lösungsraum durchschritten, der Entwurf also so modifiziert, dass der Zielfunktionswert bis zum Erreichen eines Minimalwertes abnimmt. Abbildung 4.11 zeigt das strukturierte Vorgehen:

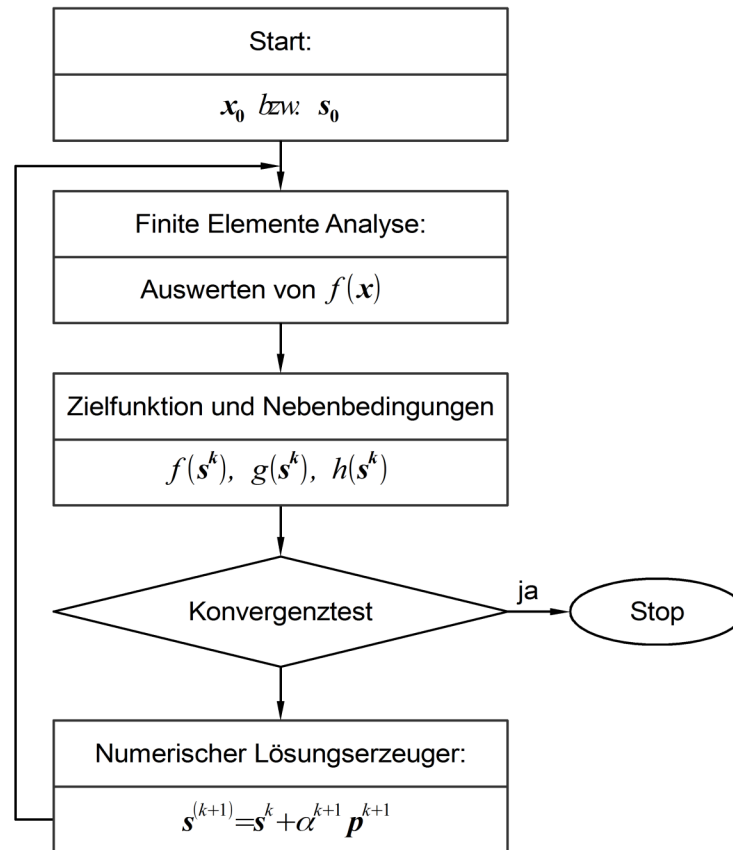


Abbildung 4.11: Strukturoptimierungsroutine der mathematischen Programmierung

Ein Initialentwurf, resultierend aus einer Strukturanalyse (Anwendung der FE-Methode), enthält erste Antwortgrößen des Systems. Zielfunktion und Nebenbedingungen werden geprüft. Mittels numerischem Lösungserzeuger wird iterativ der Lösungsraum abgeschritten, d.h. der Vektor der Optimierungsvariablen \mathbf{s}^k ist bis zu einer Abbruchschranke zu verbessern. Dies ist allgemein formulierbar:

$$\mathbf{s}^{(k+1)} = \mathbf{s}^k + \alpha^{k+1} \mathbf{p}^{k+1} \quad (4.52)$$

Mit der Festlegung einer Suchrichtung \mathbf{p} kann eine Vielzahl vorliegender Probleme auf einen eindimensionalen Zusammenhang zurückgeführt werden. Zur Lösung des vereinfachten Problems mit Bestimmung der Suchrichtung, der Schrittweite sowie des Auswertens von Zielfunktion und gegebenenfalls Nebenbedingungen sind Optimierungsalgorithmen entwickelt. Sie folgen immer einem Schema:

1. Festlegung eines Startpunktes mit: $k=0$
2. Bestimmung einer Suchrichtung: \mathbf{p}^{k+1}
3. Durchführung einer eindimensionalen Optimierung (Liniensuche): $\min f(\alpha^{k+1})$ mit dem Ergebnis α^{k+1} als Optimum.
4. Änderung der Entwurfsvariablen: $\mathbf{s}^{(k+1)} = \mathbf{s}^k + \alpha^{k+1} \mathbf{p}^{k+1}$

5. Überprüfung ob Konvergenz erfüllt, falls nicht: $k = k + 1$ und gehe zurück zu 2.
6. Optimale Lösung: $\mathbf{s}^{opt} = \mathbf{s}^{(k+1)}$

Hierbei ist α^k die Entwurfsvariable des eindimensionalen Unterproblems und kennzeichnet die Schrittweite. Die Effizienz ist stark abhängig von einer geeigneten Schrittweite und der Festlegung der Suchrichtung. Die Lösungserzeuger zur Berechnung des jeweils nächsten Entwurfs im Lösungsraum können in Verfahren nullter, erster und zweiter bzw. höherer Ordnung unterschieden werden. Mit der Differenzierung zwischen Problemklassen einer Optimierung mit Restriktion sowie ohne werden wichtige Lösungserzeuger in den ersten Abschnitten des folgenden Kapitels 4.4.3 kurz besprochen.

Kommen Gradienten der Funktionen bezüglich der Entwurfsvariablen zum Einsatz, spricht man von Gradientenverfahren. Die Bestimmung wird in der Strukturoptimierung auch als Sensitivitätsanalyse bezeichnet und macht oft einen Großteil (bis zu 90%) der Rechenzeit des gesamten Optimierungsprozesses aus. Es stehen verschiedene Ansätze zur Verfügung, wobei wiederum eine effiziente und exakte Berechnungsmethode anzustreben ist ([9], [14], [20], [55], [58], [113]). Da dies auch eine wichtige Stelle zur Kopplung des Optimierungsalgorithmus an die FEM darstellt, wird im dritten Abschnitt des Kapitels 4.4.3 darauf eingegangen.

Um den nötigen Zeitaufwand geringer zu halten, besteht weiterhin die Möglichkeit für die Systemantworten eine Approximation zu verwenden. Ein solches Unterproblem konvergiert rasch, die Iterationen der aufwendigeren FE-Analyse sinken somit ebenso drastisch. Da man aber mit Näherungen arbeitet, erhält man gute Lösungen nicht aber das wirkliche globale Minimum des Ursprungsproblems. Sowohl die Approximation nur in der näheren Umgebung der aktuellen Suchrichtung (lokale Approximation) als auch eine für den gesamten Designraum, die sogenannte globale Approximation, ist möglich. Da die globale Approximation für die große Anzahl der Entwurfsvariablen bei der Topologieoptimierung unpraktikabel rechenintensiv ist, kommen dort vor allem lokale Methoden wie die der Konvexen Linearisierung oft gekoppelt mit der Methode der beweglichen Asymptote (MMA), der Sequentiellen Linearen Programmierung (SLP) oder der Methode der Sequentiellen Quadratischen Programmierung (SQP) zum Einsatz.

Eine Zusammenfassung und vertiefende Erläuterung der zur Strukturoptimierung oft verwendeten Algorithmen sind bei BENDSÓE [16] oder auch den deutschen Vertretern BLETZINGER [20] und HARZHEIM [58] zu finden.

4.4.3 Numerischer Lösungserzeuger - Optimierungsterminologie

Optimierung ohne Restriktionen

Direkte Suchmethode

Einfache numerische Verfahren zur Minimierung einer skalaren Funktion ohne Nebenbedingungen werden Suchmethoden genannt. Sie suchen den Lösungsraum systematisch oder zufallsgesteuert direkt, also Berechnung der Gradienten der Zielfunktionswerte, ab. Daher werden sie als Verfahren 0-ter Ordnung bezeichnet. Wichtige Vertreter sind das Monte-Carlo-Verfahren (auch anwendbar bei mehreren Zielfunktionen) oder die Methode der Approximation von Subproblemen.

Methode 1-ter Ordnung

Diese Methode (ohne Nebenbedingungen) wird oft auch als NEWTON Verfahren oder Gradientenverfahren bezeichnet ([58], [89], [113], [118]). Ihr liegt die Vorstellung zugrunde, dass sich die Zielfunktion $f(\mathbf{s}^k)$ wie ein Gebirge über dem Entwurfsraum verhält. Vom nicht-optimalen Startpunkt \mathbf{s}^1 aus, folgt man schrittweise der Richtung des steilsten Abstiegs. Die Senkrechte der örtlichen Höhenlinie als Suchrichtung wird ausgedrückt durch den negativen Gradienten, der aus partiellen ersten Ableitungen für alle Variablen der Funktion besteht:

$$\mathbf{p}^{(k+1)} = -\nabla f(\mathbf{s}^k) \quad (4.53)$$

Den Entwurfsvariablenvektor für den nächsten Rechenschritt erhält man aus der Abstiegsrichtung \mathbf{p}^{k+1} und der Suchschrittweite α^{k+1} :

$$\mathbf{s}^{(k+1)} = \mathbf{s}^k + \alpha^{k+1} \mathbf{p}^{k+1} \quad (4.54)$$

Bei diesem Verfahren ist jedoch problematisch, dass die neue Suchrichtung immer senkrecht zur alten Suchrichtung steht. Das führt meist im Verlauf der Optimierung zu einer Zick-Zack-Kurve. Bei geringen Abstiegen kommt es um das Minimum herum zu einem langwierigen Iterationsprozess. Daher sind spezielle Verfahren der Schrittweitenbestimmung entwickelt worden.

Methode 2-ter Ordnung

Die hier beschriebene Methode ([9], [58], [85], [113]) folgt dem Ansatz, dass das Minimum einer Funktion über die Nullstellen der ersten Ableitung zu ermitteln ist. Basierend auf der NEWTON-Methode handelt es sich hierbei um ein Verfahren zweiter Ordnung ohne Einbeziehung von Nebenbedingungen. Die entsprechende Funktion wird

dazu an einem Punkt durch eine lineare Funktion angenähert und die Nullstelle der linearen Funktion wird bestimmt. Diese liefert dann den Ausgangspunkt (Schrittweite) für einen weiteren Iterationsschritt. Diese Vorgehensweise wird solange wiederholt, bis die wahre Nullstelle der Funktion mit hinreichender Genauigkeit angenähert wurde.

Es ist nicht ausreichend den Gradienten der betrachteten Funktion zu kennen. Zusätzlich wird die sogenannte HESSE-Matrix benötigt. Die HESSE-Matrix entspricht der Ableitung des Gradienten einer Funktion:

$$|H| > 0, \quad H = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 f}{\partial s_1 \partial s_1} & \dots & \frac{\partial^2 f}{\partial s_1 \partial s_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial^2 f}{\partial s_n \partial s_1} & \dots & \frac{\partial^2 f}{\partial s_n \partial s_n} \end{bmatrix} = \nabla \nabla^T f(s) \quad (4.55)$$

Ist die HESSE-Matrix positiv definit, dass heißt alle Eigenwerte der Matrix sind positiv, ist die notwendige Bedingung für das Vorhandensein eines Minimums erfüllt. Bildlich verlaufen die Funktionen damit oberhalb der Tangentialebenen. Die Suchrichtung ergibt sich dann aus:

$$p^{(k+1)} = -H^{-1} \nabla f(s^k) \quad (4.56)$$

Die Einbeziehung der Hesse-Matrix zur Suchrichtungsbestimmung kann aber problematisch werden, da sie sehr rechenintensiv ist. Um dieses Problem zu umgehen berechnet man die Matrix nicht am aktuellen Punkt, sie wird im Iterationsverlauf schrittweise aufgebaut, daher die Bezeichnung Quasi-NEWTON-Methode.

Optimierung mit Restriktionen

Indirekte Methode

Im Gegensatz zu restriktionsfreien Optimierungsaufgaben, ist ein „einfaches“ Gradientenverfahren für beschränkte Probleme nicht immer sofort geeignet, da in steilster Abstiegsrichtung schnell Restriktionen verletzt werden. Zunächst sind die Restriktionen in den gewählten Optimierungsalgorithmus zu implementieren. Dies kann mit zwei unterschiedlichen Ansätzen realisiert werden. Die indirekte Methode auch Straffunktionsverfahren genannt, verwendet ein Ersatzproblem (Formel 4.57) ohne Restriktion:

$$\tilde{f}(s) = f(s) + r P(s) \quad (4.57)$$

Die Restriktionen zur Überführung in ein unbeschränktes Ersatzproblem sind durch den Strafterm $r P(s)$ aus Straffunktion $P(s)$ und Skalierungsfaktor r berücksichtigt.

Befindet sich die Pseudozielfunktion $\tilde{f}(s)$ im nichtzulässigen Bereich, wird dies durch den Strafterm „bestraft“. Vorteil bei dieser Methode ist, dass die zuvor beschriebenen effizienten Lösungserzeuger eingesetzt werden können.

Direkte Methode

Einer der wichtigsten Vertreter dieser Algorithmen wird als Methode der zulässigen Richtungen (MFD) bezeichnet. Diese direkten Methoden sehen vor, dass zunächst bestimmt wird ob der Startpunkt sich im zulässigen Bereich befindet. Sollte das nicht der Fall sein, wird versucht in den zulässigen Bereich zu gelangen, wobei auf den Wert der Zielfunktion jedoch keine Rücksicht genommen wird. Befindet sich der Startpunkt im zulässigen Bereich, kann die Minimierung der Zielfunktion beginnen. Die Lösung verläuft dann identisch zu den bereits genannten Lösungserzeugern, solange keine Restriktionen verletzt werden. Sollte das aber der Fall werden, müssen Anpassungen stattfinden. Dazu sei auf Literatur verwiesen [9], [16], [107], [113], [118].

LAGRANGE Funktion und KARUSH-KUHN-TUCKER-Bedingung

Zuallermeist sind Optimierungsaufgaben der Strukturmechanik durch Nebenbedingungen beschränkt. Daher reichen die notwendige Bedingung, also das Verschwinden der ersten Ableitung $\nabla f(s^k)=0$ (Gradient), und die hinreichende Bedingung, also ein positiver Wert der zweiten Ableitung $|H|>0$ (Determinante der HESSE-Matrix), für ein beschränktes Optimierungsproblem nicht mehr aus.

Bei Aktivwerden der Nebenbedingung muss zunächst bestimmt werden, welche Bereiche für die folgenden Suchrichtungen infrage kommen. Dabei werden drei Bereiche unterschieden:

1. Brauchbarer Bereich: Liegt die Suchrichtung in diesem Bereich, dann verbessert eine Liniensuche in dieser Richtung die Zielfunktion, das heißt bei der Minimierung einer Zielfunktion sollte selbige in dieser Suchrichtung kleiner werden.
2. Zulässiger Bereich: Die Suchrichtung liegt im zulässigen Bereich, sobald man annehmen kann, dass eine Liniensuche in dieser Richtung keine Restriktionen verletzt.
3. Zulässiger und brauchbarer Bereich: In der Schnittmenge beider Bereiche liegt die Suchrichtung, falls sie die Zielfunktionswerte verbessert und zulässig ist. Das Optimum ist erreicht wenn der zulässige und brauchbare Bereich verschwindet und keine Suchrichtung mehr festgelegt werden kann.

Mathematisch lässt sich das Einbeziehen der Gleichheits- und Ungleichheitsnebenbedingungen mittels der LAGRANGE-Faktoren (η, γ) in ein unbeschränktes

Extremwertproblem überführen, die LAGRANGE-Funktion:

$$L(s, \eta, \gamma) = f(s) + \eta^T h(s) + \gamma^T g(s) \quad (4.58)$$

Nun lassen sich die auch KARUSH-KUHN-TUCKER [77] genannten Bedingungen für die Lösung eines restringierten Optimierungsproblems ableiten:

$$\begin{aligned} h(s) &= 0, \\ g(s) &\leq 0, \\ \nabla_s L(s, \eta, \gamma) &= 0 \quad \text{mit} \quad \eta \geq 0; \eta^T g(s) = 0 \end{aligned} \quad (4.59)$$

Die erste und zweite Bedingung sichert, dass nur betroffene, also aktive Restriktionen im Optimierungsablauf verwendet werden. Das heißt in der dritten Bedingung finden auch nur aktive Ungleichheitsrestriktionen Anwendung, dies führt zur erheblichen Steigerung der Wirtschaftlichkeit des Verfahrens. In der Praxis werden die KARUSH-KUHN-TUCKER-Bedingungen als Abbruchkriterium oder als Optimalitätskriterium zur Herleitung von Optimierungsalgorithmen verwendet [118]. In der Regel benutzt man die KUHN-TUCKER-Bedingungen nicht zur Lösungsfindung, sondern zum Kontrollieren von bereits ermittelten Lösungen [58].

Verknüpfung von Gradienten basierter Optimierung mit der FEM

Bei den üblichen Topologieoptimierungsverfahren handelt es sich um kontinuierliche Probleme mit einer besonders hohen Anzahl von Entwurfsvariablen. Gradientenverfahren bieten dafür eine hohe Effizienz und werden auch zuallermeist praktisch eingesetzt. Wie bereits geschildert, beansprucht die Bestimmung der Gradienten, die sogenannte Sensitivitätsanalyse, einen großen Teil der Berechnungszeit. Aufgrund des entscheidenden Einflusses dieser Analyse auf die Effektivität des Lösungsverfahrens und auch weil gerade an dieser Stelle eine direkte Kopplung an die Softwareaufgaben innerhalb der Finiten-Elemente-Analyse gegeben ist, wird darauf im folgenden Abschnitt eingegangen.

Finite Differenzen

Der einfachste Fall sieht vor, die Sensitivitäten durch die Bildung von finiten Differenzen zu bestimmen. Im eindimensionalen Fall gilt:

$$\frac{df(s)}{ds} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{f(s + \Delta s) - f(s)}{\Delta s} \approx \frac{\Delta f(s)}{\Delta s} \quad (4.60)$$

Der Differenzquotient ist dabei aus der Vorwärtsdifferenz zu ermitteln. Für den nicht-trivialen Fall von n Designvariablen folgt:

$$\frac{\partial f(\mathbf{s})}{\partial \mathbf{s}} \approx \frac{\Delta f(\mathbf{s})}{\Delta \mathbf{s}} \quad (4.61)$$

Das bedeutet, dass neben der Untersuchung am Punkt aller Entwurfsvariablen \mathbf{x} noch n zusätzliche Analysen pro Iteration errechnet werden müssen. Es ist möglich die Rechenzeit zu minimieren, indem man die einzelnen Analysen pro Iteration parallel auf verschiedenen Prozessoren rechnet, das kann jedoch nicht über die hohen Rechenkosten hinwegtäuschen.

Direkte Methode

Hilfsmittel der direkten Methode [55] ist der linear statische Zusammenhang von globalen approximierten Verschiebungen \mathbf{d} und Kraftvektor \mathbf{F} aus der FEM-Zustandsgleichung:

$$\mathbf{K}(\mathbf{s})\mathbf{d}(\mathbf{s}) = \mathbf{F} \quad (4.62)$$

Dabei ist \mathbf{K} die Steifigkeitsmatrix in Abhängigkeit der Entwurfsvariablen.

Die Zielfunktion für eine Topologieoptimierung ist zumeist eine indirekte implizite Funktion der Entwurfsvariablen und der Verschiebungslösungen als Zustandsvariablen, die wiederum von den Entwurfsvariablen abhängig sind, Gleichung 4.63:

$$f(\mathbf{s}, \mathbf{d}(\mathbf{s})) \quad (4.63)$$

Das totale Differential der Zielfunktion (die eigentliche Sensitivität) erfordert durch die implizite Beziehung von \mathbf{d} und \mathbf{s} die Produktregel:

$$\nabla_{\mathbf{s}} f_i = \frac{\partial f_i}{\partial \mathbf{s}} + \frac{\partial f_i}{\partial \mathbf{d}} \frac{\partial \mathbf{d}}{\partial \mathbf{s}} \quad (4.64)$$

Die Differentiation (auch Produktregel) der Zustandsgleichung 4.62 nach den Entwurfsvariablen liefert:

$$\frac{\partial \mathbf{K}}{\partial \mathbf{s}} \mathbf{d} + \mathbf{K} \frac{\partial \mathbf{d}}{\partial \mathbf{s}} = \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{s}} \quad (4.65)$$

Wenn man nun Gleichung 4.65 nach den Verschiebungsableitungen auflöst, erhält man:

$$\frac{\partial \mathbf{d}}{\partial \mathbf{s}} = \mathbf{K}^{-1} \left(\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{s}} - \frac{\partial \mathbf{K}}{\partial \mathbf{s}} \mathbf{d} \right) \quad (4.66)$$

Die vollständige Sensitivitätsformel ergibt sich schließlich aus Einsetzen von 4.64 in 4.66:

$$\nabla_{\mathbf{s}} f_i = \frac{\partial f_i}{\partial \mathbf{s}} + \frac{\partial f_i}{\partial \mathbf{d}} \mathbf{K}^{-1} \left(\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{s}} - \frac{\partial \mathbf{K}}{\partial \mathbf{s}} \mathbf{d} \right) \quad (4.67)$$

Da normalerweise bei einer Optimierung die Belastungen konstant bleiben, wird der Zusammenhang $\partial \mathbf{F} / \partial \mathbf{s}$ zu null. Verändert sich die Belastung während der Simulation kann der Term analytisch bestimmt werden. Die Beziehung $(\partial \mathbf{K} / \partial \mathbf{s}) \mathbf{d}$ wird analytisch oder durch finite Differenzen bestimmt. Vorteil dabei ist, dass die Steifigkeitsmatrix schon

in der vorangegangenen FE-Analyse mit \mathbf{d} faktorisiert wurde, so dass dieser rechenintensive Schritt für die Sensitivitätsanalyse entfällt. Die gesuchten Sensitivitäten der Verschiebungen können ermittelt werden. Im Fall der Topologieoptimierung entspricht die Anzahl der Entwurfsvariablen immer der Anzahl der finiten Elemente. Bei großen oder komplizierten Modellen führt die aufwändige Vernetzung daher zu einer großen Anzahl von Elementvariablen. In der Kombination mit wenigen Restriktionen (z.B. Massenrestriktion) folgt daraus eine ebenso große Anzahl von Analysen. Hierbei kann die adjungierte Methode schnellere Ergebnisse liefern.

Die adjungierte Methode

Der Ausgangspunkt der adjungierten Methode, beschrieben zum Beispiel bei HAFTKA [55] oder ESCHENAUER [34], ist der soeben hergeleitete Zusammenhang für den Gradienten der Zielfunktion nach der direkten Methode:

$$\nabla_s f_i = \frac{\partial f_i}{\partial \mathbf{s}} + \frac{\partial f_i}{\partial \mathbf{d}} \mathbf{K}^{-1} \left(\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{s}} - \frac{\partial \mathbf{K}}{\partial \mathbf{s}} \mathbf{d} \right) = \frac{\partial f_i}{\partial \mathbf{s}} + \frac{\partial f_i}{\partial \mathbf{d}} \frac{\partial \mathbf{d}}{\partial \mathbf{s}} \quad (4.68)$$

Nun werden Terme $\lambda_i = \lambda$ zur Verkürzung obiger Gleichung eingeführt, die als adjungierte Variablen bezeichnet werden:

$$\lambda = \frac{\partial f_i}{\partial \mathbf{d}} \mathbf{K}^{-1} \quad (4.69)$$

In Analogie zur FEM-Zustandsgleichung kann λ als Lösung des Gleichungssystems ermittelt werden:

$$\mathbf{K} \lambda = \frac{\partial f_i}{\partial \mathbf{d}} \quad (4.70)$$

Eingesetzt in die Gradientengleichung der Zielfunktion 4.68 ist es nun möglich, das reduzierte totale Differential zu lösen:

$$\nabla_s f_i = \frac{\partial f_i}{\partial \mathbf{s}} + \lambda \left(\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{s}} - \frac{\partial \mathbf{K}}{\partial \mathbf{s}} \mathbf{d} \right) \quad (4.71)$$

Zur Lösung werden nunmehr die einzelnen Terme wie bei der vorangegangenen Methode entweder analytisch oder semi-analytisch mit finiten Differenzen ermittelt. Wie bereits erwähnt, arbeitet dieses Verfahren effektiv, wenn das Verhältnis zwischen Entwurfsvariablen und Restriktionen sehr groß ist. Bei Size- oder Shapeoptimierung kann aber der genau konträre Fall auftreten (z.B. Dickenvariation mit Spannungsrestriktion in jedem Element). Dabei ist auf die direkte Methode zurückzugreifen.

4.4.4 Optimierungsalgorithmen der Topologieoptimierung

Sowohl die Strategie der Optimalitätskriterienverfahren (OC) als auch die der mathematischen Programmierung (MP) für die Topologieoptimierung sind verbreitet. Mit Blick

auf die schiffbaulichen Beispielimplementierungen wird je ein Vertreter besprochen, das CAO-Verfahren (OC) sowie die Methode der bewegten Asymptoten (MMA). Hintergrund ist dabei, dass beide eine wichtige Rolle für die praktische Umsetzung im schiffbaulichen Umfeld spielen, siehe Abschnitte 5 und 6.

Die Methode der bewegten Asymptoten

Dieser Algorithmus ist robust und für die Anforderungen der Topologieoptimierung mit den enorm vielen Designvariablen (entsprechend Entwurfsvariablen also Elementanzahl) sehr gut geeignet, er findet sich daher in vielen kommerziellen Softwaresystemen wieder. Die Methode der bewegten Asymptoten (Method of Moving Asymptotes – MMA) geht auf SVANBERG [128] zurück und stellt eine Verallgemeinerung des konvexen Linearisierungsalgorithmus (**convex linearization method** – CONLIN) dar [41]. Prinzipiell lassen sich gerade Topologieoptimierungsprobleme damit lösen, da die Methode für Probleme mit einer großen Anzahl von Designvariablen und vergleichsweise geringer Anzahl von Restriktionen geeignet ist.

Kernaufgabe der MMA ist die lokale Approximation (siehe auch Abschnitt 4.4.2) mit dem Ziel die Anzahl der Iterationen der Optimierung gering zu halten. Im Gegensatz zur globalen Approximation wird in der lokalen Approximation in jedem Iterationsschritt mit einem Ersatzproblem des wirklichen Optimierungsproblems gearbeitet. Der Algorithmus geht folgendermaßen vor:

1. Initiiere Startdesign \mathbf{s}^0 und ermittle Zielfunktionswerte und Ableitungen der Zielfunktion nach den Designvariablen, setze $k=0$
2. Berechne Näherungsfunktion für Zielfunktion und Restriktionen um die Designvariable \mathbf{s}^k

Das genäherte Ersatzproblem für Zielfunktion und Nebenbedingungen lautet vereinfacht:

$$\tilde{f}(\mathbf{s}^{k+1}) = f(\mathbf{s}^k) - \sum_{i=1}^n \left(\frac{p_{0i}}{u_i - s_{j0}} + \frac{q_{0i}}{s_{j0}} \right) + \sum_{i=1}^n \left(\frac{p_{0i}}{u_i - s_i} + \frac{q_{0i}}{s_i - l_i} \right) \quad (4.72)$$

Mit der Nebenbedingung :

$$\tilde{g}_j(\mathbf{s}^{k+1}) = g(\mathbf{s}^k) - \sum_{i=1}^n \left(\frac{p_{ji}}{u_i - s_{i0}} + \frac{q_{ji}}{s_{i0} - l_i} \right) + \sum_{i=1}^n \left(\frac{p_{ji}}{u_i - s_i} + \frac{q_{ji}}{s_i - l_i} \right) \leq 0 \quad (4.73)$$

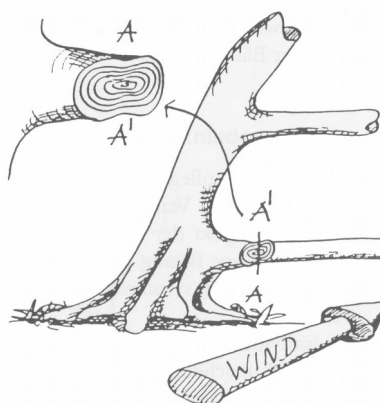
bilden p_{0i} , q_{0i} hier die Parameter für die Zielfunktion und p_{ji} , q_{ji} die für die Nebenbedingung, jeweils in Abhängigkeit des Vorzeichens der ersten Ableitung. Es werden u_i und l_i als bewegliche obere bzw. untere Asymptote bezeichnet und nach einer bestimmten Regel gewählt. Grundsätzlich kann so eingestellt werden, wie konservativ die Approximation erfolgt. Näheres hierzu ist bei SVANBERG [128]

oder BLETZINGER [20] zu finden.

3. Löse Ersatzproblem und errechne neuen Iterationspunkt s^{k+1} , an dem mit Hilfe der Ableitungen an diesem Punkt neue Näherungsfunktionen gebildet werden.
4. Bestimme die Systemantworten an der Stelle s^{k+1} .
5. Überprüfe Konvergenzkriterien, wenn diese nicht erfüllt sind dann gehe zu 2.
6. Optimum ist Stelle $s^* = s^{k+1}$

CAO-Verfahren nach MATTHECK

Als Vertreter der Lösungserzeuger mittels Optimalitätskriterien beruht diese Optimierung auf einem biomechanischen Ansatz, der aus natürlichen Optimierungsansätzen hergeleitet ist. Es handelt sich dabei um eine Art der Formoptimierung nach Professor CLAUD MATTHECK [86], dabei steht CAO für „Computer Aided Optimization“. Hergeleitet aus den Versuchen und Beobachtungen der Anpassung von Bäumen, beruht diese Methode darauf, mittels Oberflächenveränderungen die Kerbwirkung und damit Spannungsspitzen abzubauen, vergleiche Abbildung 4.12.



*Abbildung 4.12:
Baumbeobachtungen zum
Verhältnis
Jahresringausbildung und
Belastungsrichtung*

Ein Baum, der Belastungen vorwiegend aus einer Richtung erhält, wird ein anderes Querschnittsprofil als vergleichbare Bäume anderer Standorte enthalten. Aus diesem und vergleichbaren Phänomenen hat Mattheck sein Verfahren entwickelt; dabei ist anzumerken, dass dieses kein allgemeines Optimum hervorbringt. Die Ergebnisse beruhen allein auf einer Vorstellung über die optimalen Eigenschaften einer Struktur, im Gegensatz zu den sensitivitätsbasierten Verfahren der mathematischen Programmierung. Die formulierten Optimalitätskriterien lauten:

- Füge an höher belasteten Stellen Material hinzu.
- Trage an niedrig belasteten Stellen Material ab.

Daraus wurden zwei Verfahren abgeleitet, die direkte und die indirekte CAO-Methode. Wie bei Optimalitätskriterienverfahren üblich, besteht der Vorteil darin, dass keine mathematischen Algorithmen im Verlauf gelöst werden müssen. Lediglich die Beteiligung von FEM-Software ist erforderlich. Im Falle der indirekten Methode muss die Software zudem in der Lage sein, thermische Rechnungen ausführen zu können. Beide Methoden berechnen die Verschiebung der Kontur in den Randknoten. Herangezogen werden dabei die Ergebnisse für die VON MISES Vergleichsspannungen. Die indirekte Methode verwendet Temperaturunterschiede als Indikatoren für die Konturverschiebung, die wiederum an eine finite Elemente Analyse gekoppelt ist. So benötigt diese Methode bis zu drei Berechnungsschritte je Iterationsschritt. Anders in der direkten Methode, hierbei wird die Verschiebung direkt aus den Spannungen ermittelt. Dafür ist die Knotenspannung σ_i mit einer Referenzspannung σ_{Ref} zu vergleichen. Aus der Differenz beider Spannungen wird direkt die Verschiebung d_i eines Knotens berechnet. Die Verschiebung erfolgt in orthogonaler Richtung zur Oberfläche, im zweidimensionalen Fall in Normalenrichtung n_i zur Außenkontur. Dabei ist es möglich, dass Material sowohl angelagert als auch abgetragen wird. Ein Skalierungsfaktor s ist weiterhin enthalten, sodass die Überhöhung der Verschiebung gesteuert werden kann. Damit ist auch eine Einflussnahme auf die benötigten Iterationsschritte möglich:

$$\vec{d}_i^k = s(\sigma_i^k - \sigma_{Ref}) \vec{n}_i^k \quad (4.74)$$

Ein höherer Skalierungsfaktor sorgt für eine schnellere Verformung und sollte somit schneller ein hinreichend gutes Ergebnis hervorbringen. In der Literatur [58] ist ein Faktor von 0,2 empfohlen. Die Referenzspannung kann auf verschiedenen Wegen definiert werden. Zum einen ist es möglich einen skalaren Wert vorzugeben. Da die Verschiebungen aus der Differenz zwischen der Referenzspannung und Knotenspannung ermittelt werden, ergibt sich für die Außenkontur nach Erreichen einer homogen Konturspannung die Referenzspannung. Damit kann mit dieser Methode indirekt die Sicherheit des Bauteils vorgegeben werden. Eine zweite Möglichkeit ist die Spannung an einen Knotenpunkt zu koppeln. Hieraus ergibt sich, dass die finale Spannung die in der Kontur vorherrscht, vor Beginn der Berechnung nicht bekannt ist.

Vorteil beider Methoden ist, dass sie relativ leicht umzusetzen sind und sowohl für zwei- als auch für dreidimensionale Probleme anwendbar sind. So werden Sie im folgenden Kapitel auf Überführbarkeit und Praxistauglichkeit bei schiffbaulichen Konstruktionen geprüft und bewertet.

5 Verfahrensentswurf - Programmierumsetzung

„Die wahrscheinlich beste Art, sich mit der Implementierung einer Finite-Elemente-Berechnung vertraut zu machen, ist die Betrachtung eines wirklichen Rechner-Programms, das zwar in verschiedenen Bereichen vereinfacht sein mag, das aber dennoch alle wichtigen Gesichtspunkte allgemeinerer Programme enthält.“ [10]

Ziel der Arbeit ist es Möglichkeiten für den Einsatz der materiellen Topologieoptimierung bei der Entwicklung von schiffstechnischen Konstruktionen zu entwickeln. BATHE folgend und auf den Gesamtprozess der Schiffskonstruktionsentwicklung erweitert, werden daher als erster Schritt einer Implementierung vereinfachte (2D) Beispiele zur Topologieoptimierung aus dem schiffbaulichen Umfeld selbst programmiert. So können hergeleitete theoretische Grundlagen der materiellen Topologieoptimierung aus den vorangegangenen Abschnitten eingehend praktisch untersucht sowie erste Aussagen zur Überführbarkeit in den Schiffbau gemacht werden. Praktische Anwendungen werden selbstverständlich meist mit kommerziellen Programmsystemen realisiert werden. Diese vertieft zu analysieren ist aber nur eingeschränkt möglich, da die hinterlegten Routinen und Algorithmen natürlich das Knowhow des jeweiligen Herstellers darstellen.

EVAN's klassische Spirale, siehe Abbildung 1.4, verbessert iterativ und erfahrungsbasiert das Schiffsdesign. Konstruktion und Bemessung starten dabei nahezu parallel. Die geplante Beteiligung von Strukturoptimierungswerkzeugen erfolgt in vielen Industrien aber bereits vielfältig. So werden Ergebnisse der Topologieoptimierung oft direkt übernommen. Gerade bei Gussbauteilen kann das gefundene Layout nach einer nochmaligen Feinabstimmung (Formoptimierung) auch gebaut werden, vergleiche Abbildung 5.1:

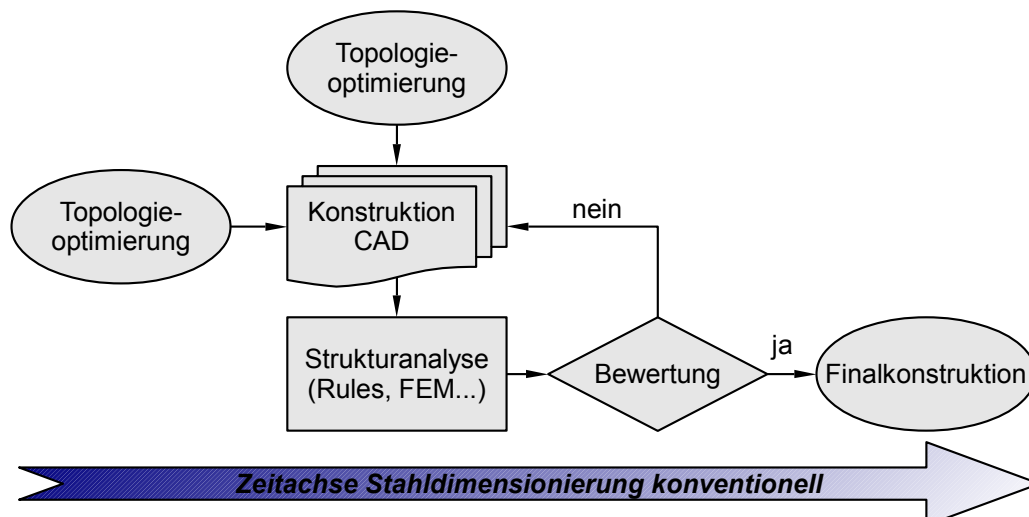


Abbildung 5.1: Struktogramm der zeitlichen Eingliederung der Topologieoptimierung in den Schiffsdesignprozess

Ohne weiteres kann diese Vorgehensweise für die Konstruktion der Stahlschiffsstruktur nicht übernommen werden. Vielmehr wird in dieser Arbeit ein Konzept entworfen und verfolgt, dass zwar auch die Methoden an ähnlicher Stelle integriert, aber dennoch die schiffbaulichen Entwurfswerkzeuge (vor allem CAD) und die Gestaltungsgrundsätze (Spantbauweise) berücksichtigt. Der übliche hohe Realisierungsgrad des Topologielayouts ist aber schiffbaulich nicht angestrebt. Die Ergebnisse dienen dem Konstrukteur vielmehr als Kraftmanagementoption. Zugunsten zukünftiger praktischer Anwendbarkeit wird das damit einhergehende „Entfernen“ globaler Minima bzw. Maxima deterministischer Optimierung in Kauf genommen. Letztlich wird angestrebt, dem entscheidenden Schiffbaukonstrukteur die Ergebnisse der Topologieoptimierung als Werkzeug zur Verfügung zu stellen, mit deren Hilfe die Konstruktion zielgerichtet verbessert werden kann. Das dreidimensionale Layout der Topologieoptimierungsergebnisse dient dann als eine Art Hintergrundbild bzw. Blaupause zur zielgerichteten Strukturverbesserung innerhalb des notwendigen Spantrasters. Trotz dieses Verfahrensentswurfes wird in den folgenden Beispielen soweit das sinnvoll und machbar ist, an der Vorgehensweise zum globalen Optimierungsproblem entsprechend des *Drei-Säulen-Modells* nach ESCHENAUER, siehe Abschnitt 2.3.2, festgehalten.

5.1 Numerische Programmier- und Simulationsumgebung

Bei den nachfolgend vorgestellten Berechnungsschemata wurde die Software *Matlab*[®] (**Matrix Laboratory**) benutzt. Dies ist ein mächtiges Werkzeug zur Programmierung und Ausführung wissenschaftlich-technischer (vordergründig numerischer) Berechnungen und dazugehöriger Visualisierungen. Als matrizenbasierte Programmierumgebung bietet es neben einer umfangreichen Standardfunktionalität auch diverse Zusatzbibliotheken, die problembezogenen Algorithmen und spezielle Lösungen bereitstellen. Damit können sowohl numerische Ansätze für einfache zweidimensionale Lösungen nach der Methode der finiten Elemente als auch verschiedene Optimierungsalgorithmen und -ansätze entwickelt und beispielhaft implementiert werden[139].

Analysemodelle der Topologieoptimierung beruhen auf finiten Elemente Analysen. Bei komplexeren Modellen, gerade im dreidimensionalen Bereich, sind Spezialtools vorzuziehen. In der Arbeit sind das die Applikationen von *Altair Engineering, Inc.* [2], mit dem Preprocessor *Hypermesh*[®], dem Solver (sowohl der linearen finiten Elemente Analyse sowie der Topologieoptimierung) *Optistruct*[®] und für das Postprocessing *HyperView*[®].

Auch für Unterstützung schiffbauspezifischer technischer Problemstellungen sind Softwarewerkzeuge am Markt etabliert. So ist das Programm Poseidon [30] der Klassifikationsgesellschaft DNV-GL ein verbreitetes Hilfsmittel für die Analyse und Dimensionierung schiffbaulicher Stahlstrukturen im Entwurfs- und Konstruktionsstadium. Die Kriterien der notwendigen Abmessungen, Materialanforderungen und weiterer

Parameter können hier sowohl auf Grundlage der Bauvorschriften [29] als auch direkter Bemessungsverfahren mit der FEM ermittelt werden.

Daher kommt die Software für diese Schnittstelle zum Einsatz. So können klassegerecht sowohl schiffbauliche Quer- und Längsverbände generiert als auch halbautomatisch die natürlichen Randbedingungen aufgebracht werden.

Weitergehende zur Anwendung kommende und im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Rechenabläufe inklusive beteiligter zusätzlicher Softwareprogramme werden im entsprechenden Kontext erläutert.

5.2 Beispielhafte Umsetzung - Bodenwrange 2D

Bodenwrangen sind wichtige Querbauteile in Doppelbodensektionen von Schiffen. Sie bestehen aus segmenthaft verlaufenden Plattenfeldern, begrenzt durch die angeschlossenen Seitenverbände. Innerhalb des Doppelbodens übernehmen sie die versteifende Wirkung bezüglich der Belastung auf den Bodenbereich (Außenhaut) des Schiffes einerseits sowie andererseits in Bezug auf die Innenbodenbelastung, sprich Schiffsladung oder ähnliches. Am Beispiel der Masseoptimierung soll folgend der Berechnungsablauf für die Optimierungsprozedur eingehend analysiert werden. Die physikalische Modellbildung besteht im einfachsten Fall aus einer zweidimensionalen Scheibe mit Lasteintrag auf Ober- und Unterseite. Für diesen Fall sind mit dem numerischen Berechnungstool *Matlab*[®] Lösungen aus Funktionen als sogenannte Toolboxes programmiert. Zur Beschreibung der Umsetzung befinden sich weiterhin im Anhang vertiefende Angaben inklusive einer Konvergenzstudie für die Toolboxes. Als Grundlage für die Optimierungstoolbox wird auf die Arbeiten von TALISHI [132] aufgebaut. Dort werden für Forschung und Lehre eine umfangreiche Sammlung an Funktionen für die Lösung von Topologieoptimierungsproblemen mit Hilfe von polytypen Elementen zur Verfügung gestellt. Aber in Konsequenz dieser Arbeit wird sich weiterhin für die Gesamtprozedur an dem mehrfach erläuterten 3-Säulen-Modell mit seiner Verknüpfung von Simulation und Optimierung orientiert. So bleiben Validierungsmöglichkeiten aller Bestandteile erhalten. Im Abschnitt Systembeschreibung findet die Initialisierung für die gesamte Prozedur statt. Dann beinhaltet das Analysemodell alle Programmierarbeiten zur Finiten-Elemente-Analyse, aufbauend auf FERREIRA [38] und KOLUKULA [72]. In der dritten Säule finden sowohl die Modellgenerierung aus dem Simulationsergebnis als auch die algorithmischen Berechnungen zur Topologieoptimierung statt. Den Überblick übergeordneter Funktionsaufrufe gibt Abbildung 5.2.

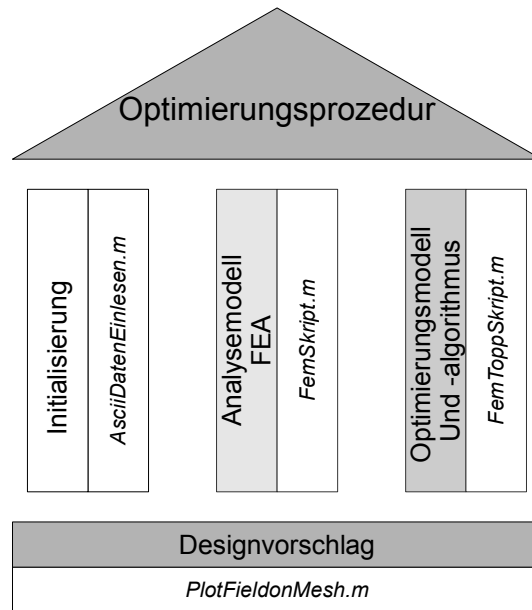


Abbildung 5.2: Schema Matlab-Programmierung – Säulenmodell

5.2.1 Initialisierung – Entwurfsmodell

Mit der vereinfachten zweidimensionalen Betrachtung ergibt sich die Modellbildung mit Konsequenzen für das numerische Berechnungsmodell wie für die gesamte Optimierung. Für die korrekte Interpretation der Ergebnisse wird diese näher betrachtet. Zur Reduzierung der Freiheitsgrade wird zunächst eine Symmetrie des Doppelbodens sukzessive Bodenwrange bezüglich der Mittellinie gebildet. Die resultierende Geometrie besteht aus ebenen Berandungen (Symmetrieebene, Innenboden, Seitenverband, Anschluss Längsträger, Außenhaut Bodenbereich) und einem gekrümmten Rand (Außenhaut Kimmausrundung), Abbildung 5.3.

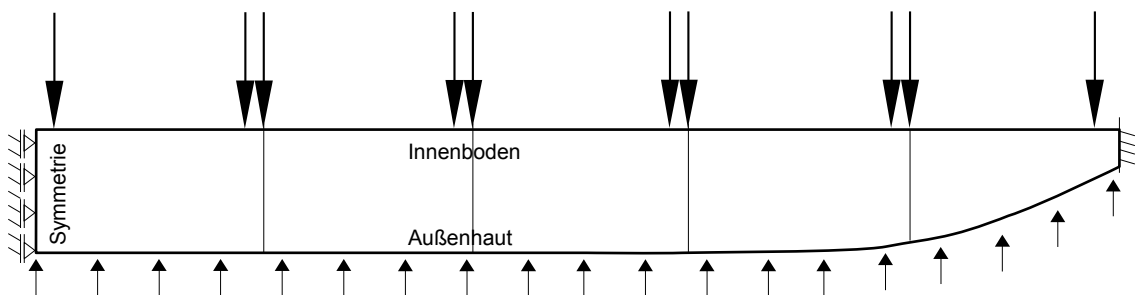


Abbildung 5.3: Bereinigtes 2D-Entwurfsmodell der Bodenwrange

Aus der Skizze geht auch hervor, dass weitere Spezifika der Bodenwrange wie z.B. Erleichterungslöcher, Stützbleche, Spantfreischnitte oder Beulsteifen nicht berücksichtigt werden. Bis auf die geschweißten (steifen) Verbindungen zu den Längsträgern werden fertigungstechnische Aspekte nicht berücksichtigt. Ein solches physikalisch exakteres

Modell wird in Abschnitt 6 zur Topologieoptimierung einer Bodenwrange in 3D vorgestellt.

Für die mechanische Modellbildung wird hier aus der Bodenwrange ein zweidimensionales Scheibenproblem. Anfangs- und Randbedingungen sind der obigen Skizze zu entnehmen und in Tabelle 3 numerisch aufgelistet. So wird der Anschluss der Wrange zum Schiffsseitenverband sowie die Längsträgeranschlüsse als fest eingespannt angesetzt. Um den Matlab-Toolboxen zu genügen, werden geometrische Lasten des Modells aus punktuellen Einzellasten (Innenboden z.B. Containerfußpunkte) als auch aus Linienlasten (hydrostatischer Wasserdruck) als knotenäquivalente Einzellasten modelliert. Mit der Reduzierung auf eine zweidimensionale Scheibe muss auch der Lasteintrag und die Steifigkeitserhöhung an den Längsspantpunkten berücksichtigt werden. Vereinfacht wird dies durch ortsgebundene erhöhte knotenäquivalente Einzellasten modelliert.

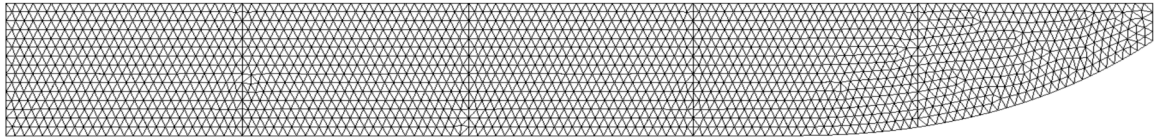
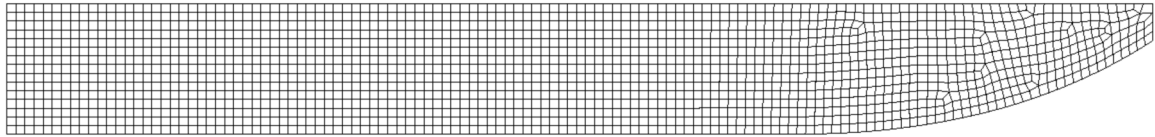
Tabelle 3: Wichtige Parameter für das Simulationsmodell 2D Bodenwrange

Anfangsbedingung	
Rechter Rand / Anschluss Seitenverband	Feste Einspannung / Sperrung aller Freiheitsgrade ($u_x = u_y = 0$)
Linker Rand / Mittelebene	Einspannung bzw. Symmetrie ($u_x = u_y = 0$)
Anschlüsse Längsträger	Einspannung ($u_x = u_y = 0$)
Randbedingungen	
Containerlast Innenboden	$F_o = 100 \text{ kN}$ Knotenäquivalente EL
Hydrostatischer Wasserdruck Außenhaut (T=10,10m)	$q_w = 1,2 \text{ kN}$ Knotenäquivalente EL (bei gew. Kantenlänge)
Lasteintrag/Steifigkeit Längsspannen	$q_w = 10 \text{ kN}$ Knotenäquivalente EL
Materialkennwerte	
Elastizitätsmodul	$E = 210\,000 \text{ N/mm}^2$
Querkontraktionszahl	$\nu = 0,3$
Dichte	$\rho = 7,85 \cdot 10^{-9} \text{ kg/mm}^3$
Property	
Plattenstärke	$t = 10 \text{ mm}$

Zur weiteren Modellbildung gehören Netzgenerierung und Elementauswahl. Aus Gründen der Übersichtlichkeit der programmierten Funktionen in Matlab und zur Anwendbarkeit auf eine Vielzahl geometrischer Probleme ist die Vernetzung des Gebietes bzw. Bauraumes ausgelagert. Die Geometrie hat auch Einfluss auf die Elementwahl. Einfache Rechteckelemente bedürfen einfacher Geometrien. Schiffbauliche Krümmungen können sich da als schwierig oder gar unbrauchbar erweisen.

Daher kommen hier nun lineare Viereckselemente Q4 als auch lineare Dreieckselemente T3 entsprechend der Herleitung in 4.2.2 zur Anwendung, Tabelle 4.

Tabelle 4: Spezifikation der Vernetzungsparameter 2D Bodenwrange

Bezeichnung	Elementtyp	Elementkantenlänge \emptyset	Elementanzahl	Knoten- anzahl
T3 bzw. CST	Lineares Dreieckselement	100 mm	3637	1957
				
Q4	Bilineares Viereckselement	100 mm	1787	1926
				

5.2.2 Analysemodell Bodenwrange 2D

Berechnungsablauf FEA

Mit der zuvor besprochenen Initialisierung aus Systembeschreibung und Randbedingungen existiert ein Entwurfsmodell. Die Diskretisierung in Form der Vernetzung mittels zweidimensionaler Scheiben entweder nur durch quadratische Elemente Q4 oder Triaelemente CST vervollständigt das Analysemodell für das Beispiel Bodenwrange. Für beide Formen getrennt kann nun in direkter Korrelation zur erarbeiteten Theorie nach Abschnitt 4.2.2 eine Toolbox für das tiefere theoretische Verständnis entwickelt werden.

Tabelle 5: Funktionsbezeichnung der FEA Toolbox

Bezeichnung	Zweck
*.fem	Daten für Vernetzung im Ascii-Format
FemSkript.m	Ein- und Ausgabebereich Simulationsmodell
Asciidateneinlesen.m	Datenaufbereitung des Vernetzungsdatensatzes
FEA.m	Gleichungssystemlösung
PlotMesh_oNetz.m	Ausgabeprot I zur Kontrolle eingelesener Daten
PlotMesh.m	Ausgabeprot II zur örtlichen Vernetzungskontrolle
PlotDisplacement.m	Plot III zur Darstellung der Verschiebung
FormStiffness2D.m	Komplettberechnung globaler Steifigkeitsmatrix
Stresses2D.m	Knotenweise Spannungsberechnung
PlotSigmaXX.m	Plot IV zur Darstellung der Spannung σ_{xx} an allen Gausspunkten

Mit den darin enthaltenen Funktionen und Algorithmen (Tabelle 5) kann die Interaktion der finiten Elemente Analyse für das zweidimensionale Scheibenproblem wie folgt dargestellt werden:

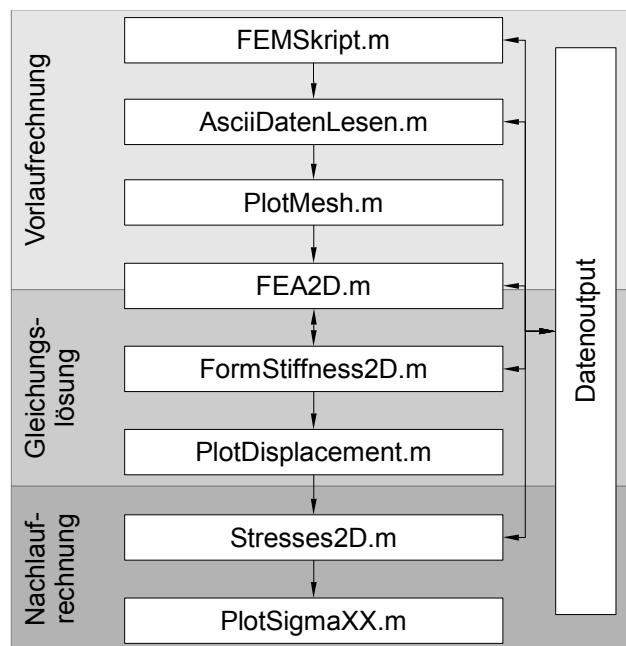


Abbildung 5.4: Schema für Berechnungsablauf mit der FEA

Es ist ersichtlich, dass relativ wenige Funktionen separiert sind. Ein mehr objektorientierter Ansatz würde Abhilfe schaffen und Vorteile mit sich bringen. Für das Verständnis der Theorie ist das in diesem Falle aber nicht notwendig. Der Zusammenhang lässt sich

schrittweise ableiten. Dabei bildet *FemSkript.m* die Hauptfunktion. Hier findet das Einlesen und die Aufbereitung zur internen Verarbeitbarkeit mit Parametereingaben und Variablendeklaration statt. Schrittweise werden alle Bereiche des Analysemodells gesteuert inklusive Ein- und Ausgabebereich. Beginnend mit der Gebietszerlegung und Diskretisierung werden die Initialisierungsdaten der Vorlaufrechnung mit externer Software bearbeitet. Um diese im ASCII-Format vorliegenden Daten einzulesen, ist die Funktion *AsciiDatenLesen.m* geschrieben. Damit können alle denkbaren FE-Gebietszerlegungen entsprechenden Formates automatisiert eingelesen und für die Weiterverarbeitung als Matrix zu Knotenkoordinaten, Elementkonnektivität, Materialkonstanten usw. aufbereitet werden. So stehen globale (Initialisierungs-)Variablen für die gesamte Routine zur Verfügung. Für eine Überprüfung ist es an dieser Stelle möglich, die importierte Vernetzung durch Aufruf von *PlotMesh.m* zu visualisieren, wie beispielhaft in obiger Tabelle 4. Darin ist die verschiedene Netzkonfiguration, entweder nur mit vierknotigen Elementen linearen Ansatzes Q4 oder linearen Dreieckselementen T3, zu erkennen. Diese werden in der Arbeit separat behandelt. Nach der Zuordnung erfolgt der Aufruf des Programmes bzw. der Funktion *FEA.m*. Hier erfolgt die Steuerung der eigentlichen Gleichungslösung. Dazu wird zunächst aus den Werkstoffkonstanten die Stoffmatrix nach Gleichung (4.3) aufgebaut. Nun kann mit Hilfe der Funktion *FormStiffnes2D.m* eine globale Steifigkeitsmatrix aufgebaut werden. Grundlage der Integration zur Steifigkeitsmatrix nach Gleichung (4.17) bildet die hier einfache zweidimensionale GAUSS-Quadratur (4.26) der $[\xi\eta]$ -Transformation mit den bezogenen Formfunktionen nach Gleichung (4.20). Die Berechnung der Dehnungsmatrix kann nur mit Hilfe der JAKOBI-Matrix bzw. Determinante nach Gleichungen (4.22) und (4.15) erfolgen. Nach dem schrittweisen Auffüllen von **B**, **C** und der Determinante $\det(\mathbf{J})$ erhält man schließlich die globale Steifigkeitsmatrix, die wieder zurückgegeben wird. In der *FEA.m* erfolgt nach Initialisieren des globalen Lastvektors die eigentliche Lösung des linearen Gleichungssystems. Mit der Ermittlung der Verschiebungen kann die Nachlaufrechnung starten. In der kleinen Funktion *Stresses2D.m* werden alle drei vorhandenen Spannungsanteile mit Hilfe von Gleichung (4.28) in den GAUSS-Punkten ermittelt. Für die Visualisierung dient die Plotfunktion *PlotSigmaXX.m* mit der Darstellung der Normalspannungswerte in x.

Ergebnisdiskussion FEA

Neben der Vergleichbarkeit bzw. Validierung ist der wohl größte Vorzug der eigenen Programmierung die Nachvollziehbarkeit. So können an jeder Stelle Werte ausgelesen werden, eine Vielzahl von Daten entsteht. Für die Bodenwrange 2D mit linearer Dreieckselementspezifikation nach Tabelle 4 erhält man folgendes:

Tabelle 6: Liste mit Datenoutput aus FEA Toolbox

Bezeichnung	Variable	Werte [min ...max]	Einheit
Elements	Inzidenzen in Matrixform [1787x4]		
Force	Kraftvektor Lokalmatrix [141x3]		N
FORCE	Kraftvektor Globalvektor [3852x1]		N
ActiveDof	Aktive geometr. Randbedingungen in Globalvektorform [3763x1]		
C	Stoffmatrix [3x3]		
UX	Verschiebung in x [1926 x 1]	[-0,0446 ... 0,0079]	m
UY	Verschiebung in y [1926 x 1]	[-0,1031 ... 0,0316]	m
Stiffnes	Globale Steifigkeitsmatrix [3852x3852]		
Stress	Globalfeld der Spannungswerte [1787x4x3]		
Sigma_XX	Matrix Normalspannung in x [1787x4]	[-35,25...21,51]	N/mm ²

Für die Kontrolle ist auch die Darstellung der Verschiebung über das Vernetzungsgebiet wichtig. Deutlich erkennbar sind Spitzen an den stark lokalen Lastenträgen infolge Containerbelastung.

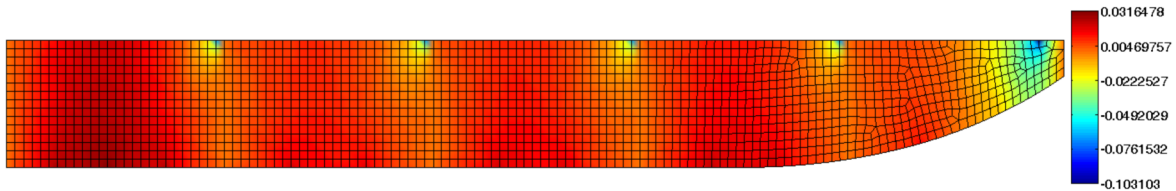


Abbildung 5.5: Darstellung der (approximierten) Verschiebungen mit FEMSkript.m für 2D Bodenwrange mit 100mm Q4 Elementen

Ein ausführlicher gegenüberstellender Vergleich mit Ergebnissen der kommerziellen Software im Anhang beweist die richtige Implementierung für das Simulationsmodell Scheibenproblem. Auch die Spannungen, zum Beispiel der Anteil der Normalspannungen in x-Richtung, lassen sich visualisieren. Aber für die Topologieoptimierung sind diese Sekundärergebnisse nicht notwendig. Für die Minimierung der Nachgiebigkeit gehen die Werte der Verschiebungen an den Knoten ein.

5.2.3 Optimierungsmodell Bodenwrange 2D

Berechnungsablauf Topologieoptimierung

Angestrebt ist eine Massereduzierung der Bodenwrange. Diese spiegelt sich in der Wahl der Nebenbedingungen für das Volumen wider. Die Volumenrestriktion ermöglicht, es

einen prozentualen Wert vom Ausgangsvolumen zu definieren. Als Ungleichheitsrestriktion angesetzt, wird der Löser gezwungen ein Mindestvolumen respektive Masse aus dem Entwurfsraum zu „entfernen“. Wiederum lässt sich der (der FEA übergeordnete) Ablauf in einem Struktogramm mit den Bezeichnungen der kleinen Matlabprogramme als eigenständige Funktionen darstellen, Abbildung 5.6. Basierend auf den Matlabimplementierungen bei TALISHI [132], werden die Ergebnisse des vorgenannten Analysemodells (Finite Elemente Analyse) mit den Algorithmen der Topologieoptimierung in einer Toolbox aus diversen Funktionsprogrammen zusammengeführt.

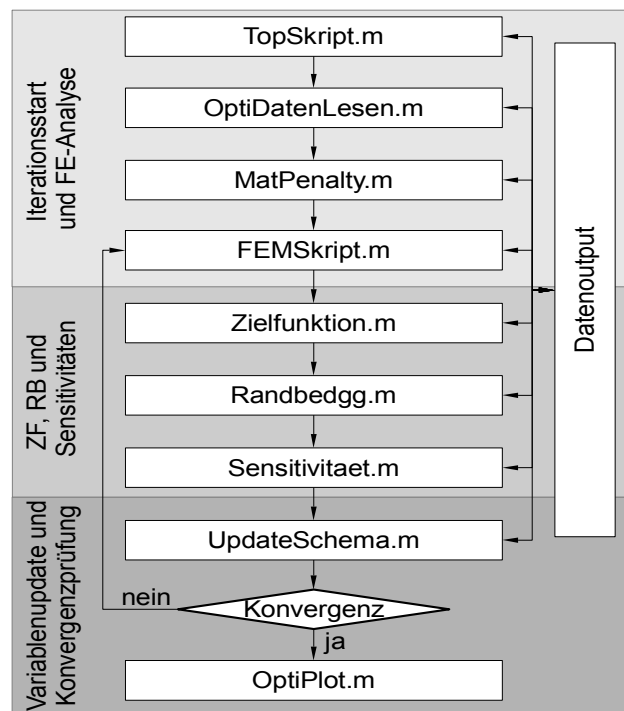


Abbildung 5.6: Ablaufschema Gesamtablauf der Topologieoptimierung in der Topopti-Toolbox

Der Algorithmus startet mit globalen Deklarationen. Aus der Hauptfunktion *TopSkript.m* werden alle Aufrufe und Steuerungen getätigt. Mit Hilfe der Funktion *OptiDatenLesen.m* können benötigte Daten eingelesen und zur Weiterverarbeitung aufbereitet werden. Die Kopplung von Optimierungs- und FE-Rechnung findet nur über den E-Modul (Zielfunktion) und die Dichteverteilung (Restriktion) statt. Darauf basiert, neben den üblichen Eingabeparametern für eine FE-Analyse, das komplette Minimierungsproblem. Nach Auswertung der Strukturanalyse in *FEMSkript.m* werden dann die Daten der Iterationsschritte als Bauraum und Entwurfsvariablen übergeben, vgl. Gleichung (4.61).

Die zugrunde liegende Gebietszerlegung bzw. Netzkonfiguration bleibt über alle Iterationen erhalten. Die angesprochene Dichte des Elements als Skalierung des E-Moduls basiert auf dem SIMP-Ansatz nach (4.36), programmtechnisch gelöst mit Hilfe der Routine

MatPenalty.m. Schrittweise in festgelegten Intervallen (im Rahmen der anfänglichen Initialisierung) wird der zugehörige Strafaxponent p entsprechend Gleichung (4.37) erhöht. So resultieren die Zustandsvariablen s für die Verschiebungen der Optimierungsaufgabe aus der FE-Analyse des aktuellen Teilschrittes. Für die Lösungserzeugung werden Zielfunktion und Randbedingungen definiert und zusammengeführt. In eigenen Unterfunktionen werden sowohl die globale Nachgiebigkeit nach (4.46) als auch die Volumenrandbedingung implementiert. Da die Iterationsvorschrift mit einer Methode erster Ordnung arbeitet, sind Gradienten der Zielfunktion als Sensitivitäten zu bilden, siehe Programmfunktion *Sensitivität.m*. Sind Zielfunktionswerte und deren Ableitungen des jeweiligen Iterationsschrittes ermittelt, wird zur Berechnung des neuen Iterationspunktes auf die Methode der bewegten Asymptoten nach SVANBERG [128] zurückgegriffen, Funktion *UpdateSchema.m*. So wird das Ersatzproblem nach Gleichung (4.72) gelöst und der neue Integrationspunkt ermittelt. Ist schließlich in der k -ten Iteration Konvergenz erreicht, wird das Ergebnis grafisch dargestellt.

Ergebnisdiskussion 2D Topologieoptimierung

Das Ergebnis der Topologieoptimierung ist eine Dichteverteilung, die sich auch als Kraftpfadmanagement deuten lässt. Man erkennt optisch den Weg von der Krafteinleitung zur Kraftabtragung bzw. -übertragung. Wie zu erwarten, müssen an den Einleitungsorten der lokalen Belastungen aus Containerlast Ansammlungen sein. Diese werden in einer Art Fachwerkstruktur zur Außenhaut abgetragen. Für die qualitative Begutachtung sind die erzielten Übersichten, Abbildung 5.7, also sinnvoll und nachvollziehbar. Dem Ziel der Programmierarbeiten ist mit dieser grafischen Zuordnung Genüge getan. Aber für eine Übertragung der Ergebnisse zu einem baubaren Designvorschlag sind die daraus erzielbaren Erkenntnisse nicht ausreichend. Die Sensitivitäten der verschiedenen Parameter der Gesamtprozedur wie Volumenrandbedingung sind noch nicht geklärt. Es zeigen sich leichte Differenzen zwischen den Ergebnissen bei Verwendung von Dreieckselementen gegenüber denen der Viereckselementvernetzung. Dies kann sowohl von der höheren geometrischen (und richtungsgebundenen) Steifigkeit des einzelnen Dreieckselementes als auch von der (gewählten) Differenz der Volumenrestriktion verursacht sein. Für die Implementierung der Algorithmen zur Topologieoptimierung wird daher dieses Beispiel der Bodenwrange erweitert auf den dreidimensionalen Raum, was einerseits verbesserte, weil realitätsnähere Modellbildung, und andererseits die Auswertungsmöglichkeiten bis hin zur CAD-Datenübertragung für den nachgeschalteten Designvorschlag ermöglicht. Dieser Weg der praktischen Analyse zur Übertragbarkeit der Ergebnisse in das schiffbauliche Umfeld wird in Abschnitt 6.1 besprochen.

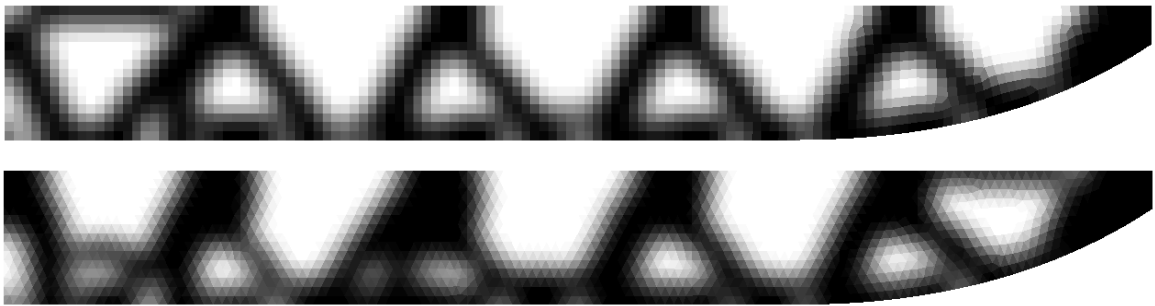


Abbildung 5.7: Oben - Ergebnis für Q4 Elemente und 50% Volumenreduktion, Unten - Ergebnis für T3 Elemente bei 40% Volumenreduktion

5.3 Beispielhafte Umsetzung - Bionische Formoptimierung bei Knieblechen

In den letzten Jahren hat sich die Bionik in vielen Feldern der Technik durchgesetzt. Die Natur als Vorbild zur Lösung technischer Probleme lässt sich auch auf Struktur-optimierungsprobleme übertragen. Basierend auf den Veröffentlichung des Autors [137] wird nun im Rahmen des Verfahrensentswurfs ein einfach zu programmierendes Beispiel der bionischen Formoptimierung (bei Anwendung auf Oberflächenbereiche) bzw. Topologieoptimierung (bei Erweiterung auf innere Anwendungsbereiche) auf ein schiffbauliches Plattenbauteil angewendet. Derartige kerbbelastete Kniebleche kommen in einer Vielzahl und in verschiedenartigen Bauweisen im Schiffbau vor [29].

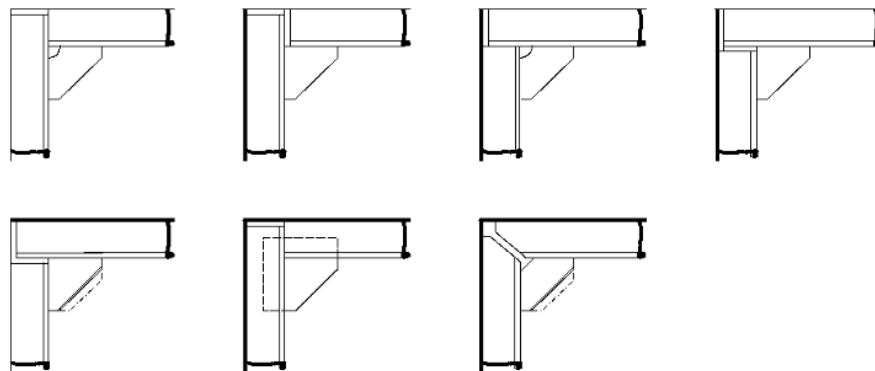


Abbildung 5.8: Beispiele für Knieblechbauarten [29]

Sie werden verwendet, um einen besseren Kraftfluss zwischen verschiedenen Strukturelementen zu gewährleisten. Aus dem Belastungsprofil eines Schiffes ergeben sich weiterhin für das Knieblech häufig wechselnde Lasten. Optimierungsziel ist daher eine Erhöhung der maximal zulässigen Lastschwingzahlen, ohne aufwendige dynamische Berechnungen, um die Kerbwirkungen zu reduzieren. Dafür eignet sich als Vertreter der Klasse der Optimalitätskriterienverfahren die in Abschnitt 4.4.4 eingeführte CAO-Methode von MATTHECK [87].

5.3.1 Systembeschreibung und Entwurfsmodell

Das gewählte Knieblech ist in eine typische Schiffsstruktur eingebettet. Es verbindet einen Spanten mit dem Unterzug. Beide Träger bestehen aus Wulstflachstahlprofilen vom Typ HP 200x10. Belastet wird die Struktur zum einen durch hydrostatischen Wasserdruck auf die Außenhaut und zum anderen durch eine konstante Deckslast. Als geometrische Randbedingungen gelten am unteren Deck eine feste Einspannung sowie eine Symmetrieebene Mitschiffs. Abbildung 5.9 zeigt die beschriebene mechanische Modellbildung:

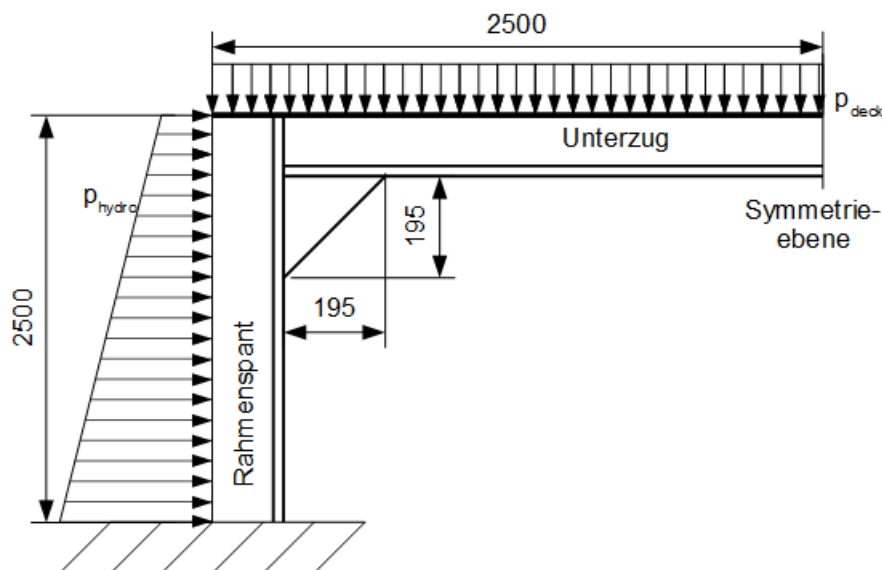


Abbildung 5.9: Entwurfsmodell für die Optimierung des Knieblechs

5.3.2 Praktische Umsetzung

Das Konzept der CAO beruht auf dem Axiom, dass an Stellen mit hohen Spannungsgradienten Kerbwirkung entsteht und durch gezielte Oberflächenveränderungen abbaubar ist. Das Optimalitätskriterium lässt sich nach Gleichung 4.74 formulieren. Benötigt wird lediglich die im Bauteil vorhandene VON MISES Vergleichsspannung. Diese geht aus einer gekoppelten FE-Rechnung hervor. Aus diesem Bedarf der wechselseitigen Abhängigkeit heraus, ist ein Workbenchkonzept mit Master-Slave-Modus entwickelt worden. Die Steuerungs- und Optimierungsroutinen finden in Matlab als Master statt. Der lineare FE-Löser Optistruct von Hyperworks berechnet die nötigen Vergleichsspannungen im Element für den jeweiligen Iterationsschritt, vgl. Abbildung 5.10:

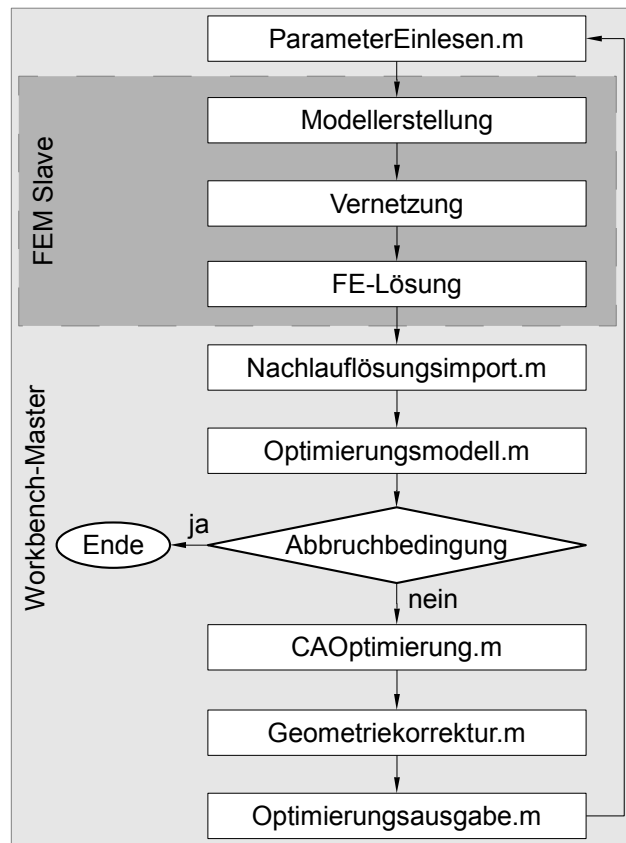


Abbildung 5.10: Ablaufschema
Workbenchkonzept Toolbox

Das Werkzeug ist grundsätzlich in zwei Teilbereiche untergliedert. Der erste Bereich stellt die Initialisierung da. Hierbei werden die für die Optimierung notwendigen Informationen übergeben. Dazu gehören die Iterationsschritte und die Pfade der verknüpften Programme. Zudem werden Steuerungsparameter für die Optimierung übergeben, wie die vorab wählbare Referenzspannung und der Skalierungsfaktor (Gleichung 4.74). Nach der Initialisierung erfolgt die eigentliche Optimierung. Diese ist unterteilt in verschiedene Unterprogramme und wird bis zum Ende der Optimierung jedes Mal vollständig ausgeführt. Der erste Schritt einer Iteration ist die Spannungsberechnung und erfolgt skriptgesteuert in *HyperWorks*. Das Programm wird dabei im Batchmodus ausgeführt und in verschiedene Schritte unterteilt (Geometrieerzeugung, Vernetzung, Randbedingungen und Solverdaten schreiben). Nach der Gleichungslösung im Solver *Optistruct* werden in *Matlab* Knotenspannungen aus den Elementspannungen ermittelt. Danach erfolgt eine Speicherung des gesamten Iterationsschrittes. Hierbei wird das Modell mit dem Berechnungsergebnissen und der vorgegebenen Geometrie archiviert. Im nächsten Schritt werden die Abbruchbedingungen geprüft. Dem folgt die Optimierung der Geometrie. Die Zielfunktion der Optimierung ist formuliert als Minimierung der Spannungsdifferenz

$$\Delta \sigma = \min[\max(\sigma_i, i \in B) - \min(\sigma_i, i \in B)] \quad (5.1)$$

Für die Ermittlung der Konturverschiebung wird eine modifizierte Variante verwendet. So können Einschnüreffekte auftreten, wenn die Geometrie sich stark ändert und die Spannungen an der Kontur in etwa gleich sind:

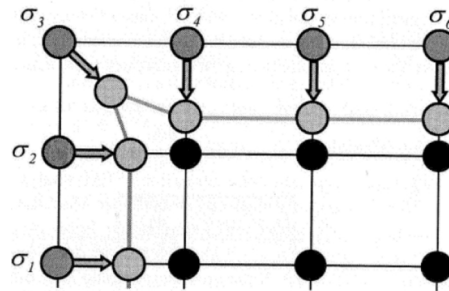


Abbildung 5.11: Visualisierung der Einschnüreffekte an der Oberfläche nach [58]

Damit dann etwaige (Eck-)Knoten keine exponierte Lage annehmen und abgeschnürt werden, wird ein Faktor α eingeführt:

$$\begin{aligned} \vec{d}_i^{(k)} &= s(1 - \alpha_i)(\sigma_i^{(k)} - \sigma_{ref})\vec{n}_i^{(k)} \\ \alpha_i &= \text{sig}(\sigma_i - \sigma_{ref})\vec{n}_i^T \vec{e}_i \end{aligned} \quad (5.2)$$

Dieser wirkt den Verschiebungen entgegen, indem er höhere Verschiebungen bei hoher Krümmung erzeugt. Um für den Folgeschritt netzkonforme Oberflächen zu erhalten, erfolgt eine Glättung der Kontur. Ein weiterer benötigter Nachbearbeitungsschritt ist die Kontrolle der geometrischen Randbedingungen. Hierbei muss geprüft werden, ob die erstellte Geometrie die Bauraumgrenzen überschreitet. Wenn dies der Fall ist, wird eine entsprechende Korrektur vorgenommen. Die letzten Schritte eines Iterationsschrittes sind das Bereitstellen der Geometrie für den nächsten Iterationsschritt und der Start der nächsten Iteration.

Analysemodell – FEM-Slave

Bereits 1934 entdeckte BAUD [11] eine wichtige Möglichkeit kerbspannungsfreie Übergänge konstruktiv zu ermöglichen. Er beschrieb eine Kurve, die heute als Baud-Kurve bekannt ist. Mit der Annahme, dass spannungsfreie Übergänge in etwa gleich aussehen, kann davon ausgegangen werden, dass die zu erwartenden Begrenzungslinie des Kniebleches einer Baud-Kurve entspricht. So wird bei der Wahl der Startgeometrie weniger Wert darauf gelegt eine typische, wie in Abbildung 5.8 dargestellte Form zu verwenden. Vielmehr soll von einer dreieckigen Form ausgegangen werden.

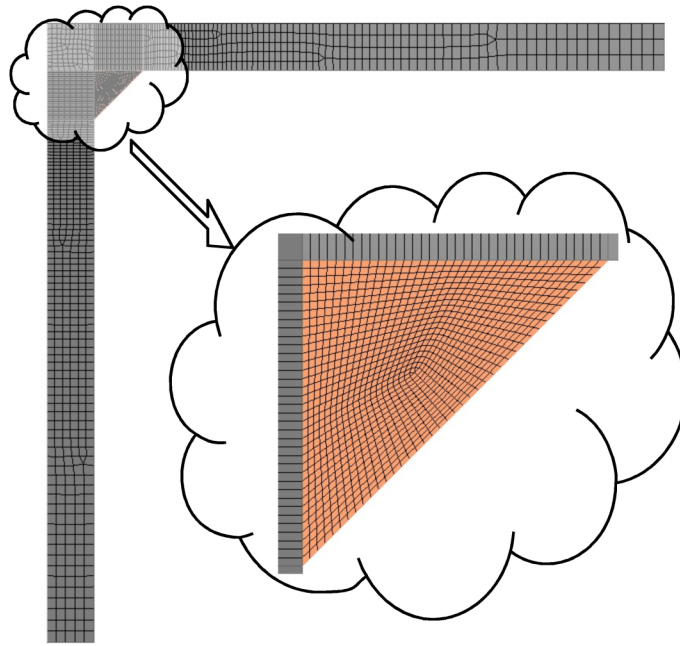


Abbildung 5.12: Analysemodell und Startgeometrie für die Knieblechoptimierung

Das dargestellte mechanische Analysemodell ist, als zweidimensionales Scheibenproblem, vollkommen skriptgesteuert in *Hypermesh* aufgebaut. Anfangs- und Randbedingungen entsprechen den bereits gemachten Angaben zum Entwurfsmodell in Form von knoten-äquivalenten Einzellasten sowie Freiheitsgradbeschränkungen der Lager, dargestellt in Abbildung 5.9. Durch die Skriptsteuerung kann nur der automatische Vernetzer genutzt werden. Für die Startgeometrie entsteht damit oft ein Mix aus linearen Q4 und CST Elementen in der Gebietszerlegung.

Tabelle 7: Parameter für das vollständige Simulationsmodell der Knieblechverbindung

Materialkennwerte	
Elastizitätsmodul	$E = 210\,000\text{ N/mm}^2$
Querkontraktionszahl	$\nu = 0.3$
Dichte	$\rho = 7.85 \cdot 10^{-9}\text{ kg/mm}^3$
Property (Blechdicke)	
Seitenwand	$t = 12.5\text{ mm}$
Deck	$t = 9.5\text{ mm}$
Wulstprofilrahmen	$t = 10\text{ mm}$
Knieblech	$t = 7\text{ mm}$
Elementanzahl (Q4 und CST)	9996

Optimierungsmodell

Eine Kerbbelastungsreduktion entspricht dem Optimierungsziel der oberflächhaften Spannungshomogenisierung. Damit werden im Rahmen der Erstellung des Optimierungsmodells neben festen Geometriepunkten auch variable Punkte an der freien Oberfläche des Kniebleches erzeugt, vgl. Abbildung 5.13. Diese stellen die Ergebnisvariablen dar, wobei als Nebenbedingungen eine Spannungsdifferenz innerhalb der Knieblechelemente (bzw. Knotenpunkte) sowie eine globale Begrenzung der Maximalspannung in Form einer Referenzspannung σ_{Ref} vorgegeben ist. Es werden zwei Referenzspannungen $\sigma_{Ref}(1)=140\text{ N/mm}^2$ und $\sigma_{Ref}(2)=200\text{ N/mm}^2$ untersucht. Um weiterhin zu beweisen, dass der Algorithmus auch von beliebigen („komplizierteren“) Formen aus starten kann, werden neben der gezeigten Dreiecksform auch abgewandelte Startgeometrien $\sigma_{Ref}(3)=200\text{ N/mm}^2$ getestet, Abbildung 5.13.

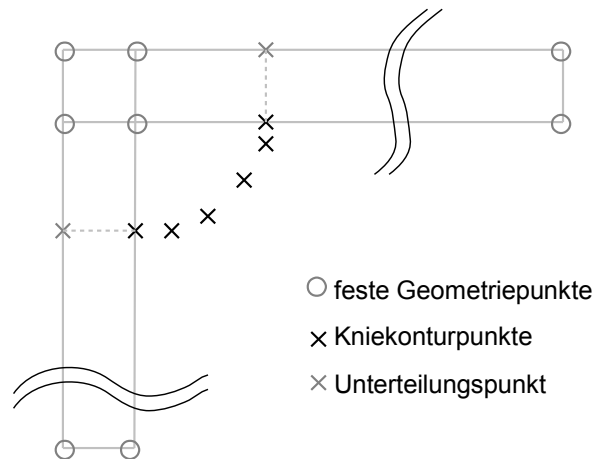


Abbildung 5.13: Schema des Optimierungsmodells mit Kniekonturpunkten

Ergebnisdiskussion 2D Formoptimierung

Für die Robustheit und damit auch Qualität der Ergebnisse werden die unstrukturierte Startkontur des Optimierungsmodells Nummer drei und die Ergebnisform nach 100 Iterationen herangezogen. So konnte der Beweis angetreten werden, dass die Ergebnisse unabhängig von der Ausgangsform und damit robust bzw. reproduzierbar sind, Abbildung 5.14.

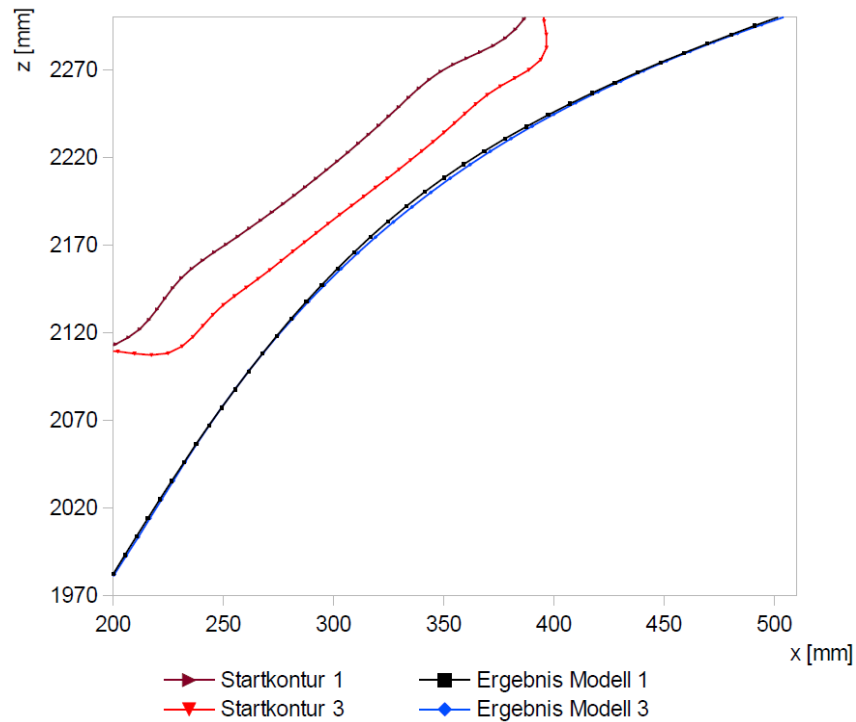


Abbildung 5.14: Vergleich der Konturen Start und Ergebnis für Modelle 1 und 3

Ziel der Optimierung für das Beispiel Knieblech ist eine Homogenisierung der Spannung über Kontur respektive Elemente der betrachteten Außenkante. In der folgenden Abbildung ist deutlich zu erkennen, dass unabhängig von der Startkontur der zu erreichende Wert der Spannungsdifferenzen etwa gegen $\Delta\sigma \approx 50 \text{ N/mm}^2$ konvergiert.

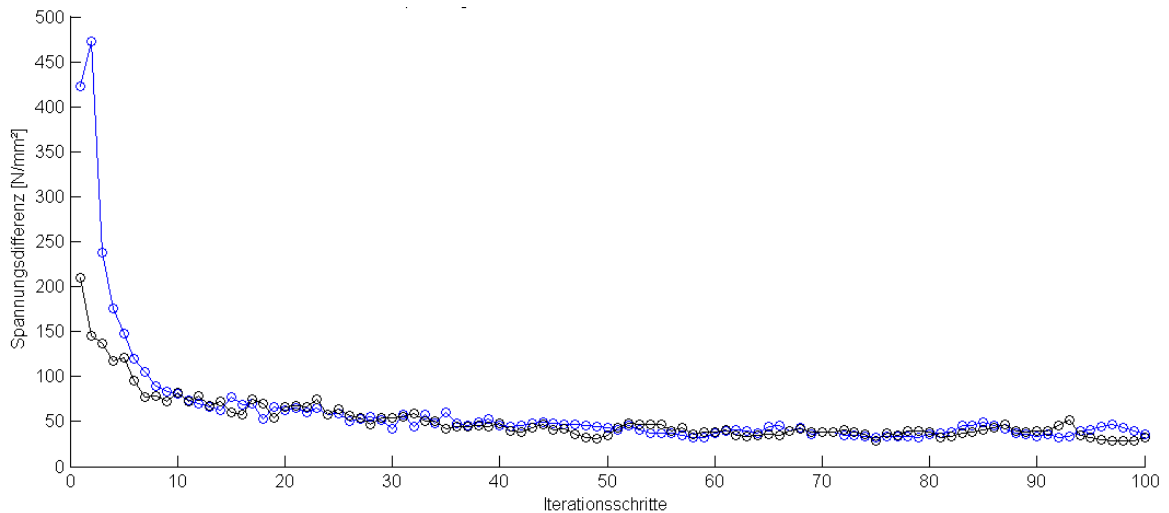
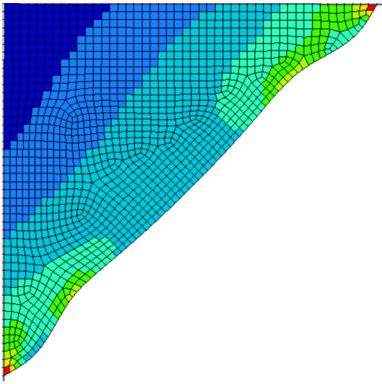
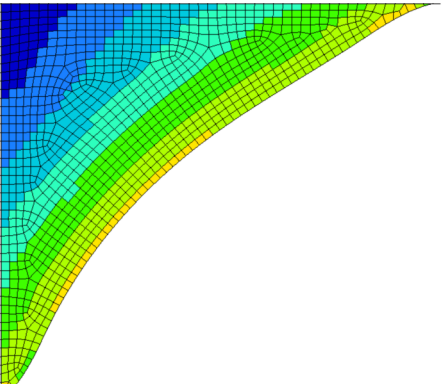


Abbildung 5.15: Iterationsverlauf der Spannungsdifferenzen der Knieblechoptimierung für die Modelle 1 (schwarz) und 3 (blau)

Dieses Ziel geht natürlich einher mit einem Anstieg der benötigten Fläche für das Knieblech und einer insgesamt höheren Belastung des Bauteils. Dieses ist aber hinnehmbar. Letztlich ist in der Zeile eins der Tabelle 8 auch die Verringerung der harten Punkte die Kerbwirkung in diesen Bereichen erzeugen zu erkennen, die sich auch quantitativ niederschlagen.

Tabelle 8: Qualitatives und Quantitatives Ergebnis für den Verlauf der Knieblechoptimierung von Modell 1

Bezeichnung	Iteration 0	Iteration 100
Plot der Vgl.-spannung		
$\min \sigma_v [N/mm^2]$	131,9	226,3
$\max \sigma_v [N/mm^2]$	227,9	181,7
Fläche $[N/mm^2]$	6012	6812

6 Stufen schiffbaulicher Implementierung

Im Schiffbau sind Klassifikationsgesellschaften für die Sicherheit von Schiffen verantwortlich. Teil dieser hoheitlichen Aufgabe ist damit auch die Sicherstellung struktureller Eigenschaften um den Schutz von Mensch und Umwelt dauerhaft zu gewährleisten. Im Bereich der Bauplanung und -durchführung stellen sie Klassevorschriften zur Verfügung. In diesen Regeln sind direkte physikalisch-strukturmechanische Berechnungen zur Auslegung schiffbaulicher Strukturen ausdrücklich erlaubt [29]. Durch die Nutzung dieses sogenannten First-Principle-Design ergeben sich damit unmittelbar neue Möglichkeiten zur Designfindung und -optimierung konstruktiver Bereiche. In diesem Abschnitt werden nun an zeitlich zwei Stellen des Designprozesses, praktische Beispiele auf Eignung zur Integration und natürlich auf Mehrwert untersucht.

Zunächst betrifft das den Bereich der Detailkonstruktion. In dieser Phase findet im Wechselspiel zwischen Strukturauslegung und CAD-Konstruktion immer schon eine Optimierung statt. Aber hier wird von den am Planungsprozess Beteiligten, noch viel Potential gesehen zu beschleunigen und weiter zu automatisieren. Damit ist der Einsatz mit dem Mittel der Topologieoptimierung gerechtfertigt und am Beispiel einer Bodenwrange eines Containerschiffes in Abschnitt 6.1 untersucht.

Um den gesamten Konstruktionsprozess aber weiter zu beschleunigen, kann das Augenmerk nicht mehr nur auf die Detailphase gelegt werden. So wird im darauffolgenden Abschnitt 6.2 die gezielte Unterstützung im frühen Stadium der Konzeptphase mit Hilfe der Topologieoptimierung untersucht. Da hier noch mehr Freiheitsgrade im Prozess vorhanden sind, sind sowohl größere Verbesserungen als auch zeitlicher Gewinn möglich. Am Beispiel des Vorschiffes wird das Potential und die Praktikabilität beim Einsatz der Topologieoptimierung in der Konzeptphase analysiert und erläutert.

6.1 *Topologieoptimierung im Detail Design am Beispiel*

Bodenwrange 3D

Grundlage dieses Beispiels bilden die Veröffentlichungen des Autors zur Masseoptimierung eines schiffbaulichen Subsystems [138]. Dabei wird ein Bereich einer Doppelbodensektion, des von der Volkswerft Stralsund entwickelten 2474 TEU Containerschiffes „SAFMARINE NGAMI“ näher untersucht, Abbildung 6.1.

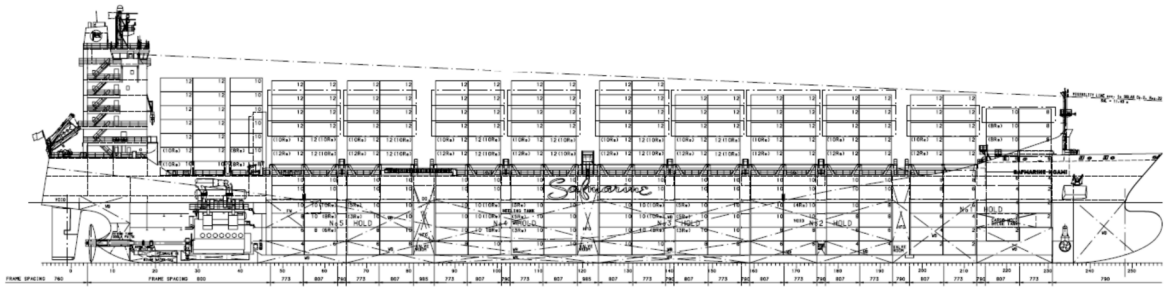


Abbildung 6.1: Seitenriss VWS Safmarine

Wie bei Frachtschiffen allgemein, so sind im Containerschiffbaubereich die Zuladungsraten natürlich von herausragender Bedeutung. Der Entwurf ist geprägt von den Abmessungen der ISO-Standardcontainer, deren vertikaler Be- und Entladung, einem hohen Decköffnungsgrades sowie der relativ schlanken Schiffsform. Damit kommt vordergründig eine Längsspantbauweise zum Einsatz.

Vor diesem Hintergrund ist es sinnvoll, Bereiche der Schiffsstruktur mit dem Optimierungsziel der Stahlmassereduzierung und hier vor allem der Querbauteile zu suchen. Im fortgeschrittenen Stadium der Detailkonstruktion ist dies aber nur eingeschränkt, also bei kleineren Subsystemen, möglich. Auch aus Sicht der Bauwerft kann ein solcher Aufwand im Rahmen der Detailkonstruktion zielführend sein. So wurden von dieser Baureihe drei Schiffe ausgeliefert. Die Materialersparnis kann damit deutlich höher ausfallen als der anfängliche Konstruktionsmehraufwand. Letztlich sind Bodenwrangen als Querbauteile für Untersuchungen zur Topologieoptimierung geeignet.

Das zu Grunde liegende Schiff kann 2474 TEU tragen und erreicht bei einer installierten Leistung von 21770 KW eine Maximalgeschwindigkeit von ca. 21,9 kn. Es besitzt 45 Zwanzigfuß-Container-Bays, wobei der Spantabstand, über die gesamte Schiffsstruktur betrachtet, aber zwischen 985/807/773/790 [mm] variiert. Damit lassen sich folgende Schiffsdaten tabellarisch zusammenfassen:

Tabelle 9: Hauptabmessungen des Schiffskörpers CV Safmarine

Variable	Wert	Einheit	Bedeutung
L_{PP}	198,75	m	Länge zwischen den Loten
L_{OA}	210,49	m	Länge über alles
B	29,80	m	Breite
D	16,40	m	Seitenhöhe
T	11,40	m	Sommertiefgang
T_D	10,10	m	Designtiefgang
C_B	0,661		Blockkoeffizient
DW	33742	t	Verdrängung
v_0	21,9	kn	Geschwindigkeit

6.1.1 Schiffbaulich funktionale Bauteileinordnung der Bodenwrange

Der numerischen Modellbildung des physikalischen Problems vorangestellt ist eine Betrachtung zu Aufbau und Gestaltung einer Bodenwrange sowie deren umliegender Struktur. Typischerweise besitzt die umgebende Doppelbodenkonstruktion regelmäßige und symmetrische zellenartige Strukturen, die aus Platten bestehen. Diese unterbinden zum einen das Beulen der Plattenfelder und zum anderen erhöhen sie das Widerstandsmoment.

Zu den Längsverbänden im Doppelboden zählen der Mittellängsträger, die Seitenträger sowie Boden und Innenbodenlängsspannten. Bezüglich der Querverbände wird lediglich auf die Bodenwrange näher eingegangen.

Bodenwrangen verhindern das Biegen um die Längsachse. Weiterhin dienen sie zur Versteifung der Außenhaut und zum Stützen des Innenbodens. Schlanke Schiffe, wie die „SAFMARINE NGAMI“ werden hauptsächlich auf Längsfestigkeit ausgelegt, die Längsverbände stellen die Hauptverbände dar. Das bedeutet, Querverbände werden an diese angeschlossen. Man unterscheidet geschlossene, volle und offene Bodenwrangen. Dabei haben volle Bodenwrangen gegenüber offenen den Vorteil geringerer Fertigungskosten, da Erleichterungs- und Durchlauflöcher beim Zuschnitt sofort mit ausgeschnitten werden. Hingegen bestehen offene Bodenwrangen aus an das jeweilige Plattenfeld angeschweißtem Profilstahl. Daraus folgernd werden somit volle Bodenwrangen im Mitschiffsbereich in Betracht gezogen.

Die vollen Bodenwrangen bestehen aus einzelnen Plattenfeldern (Segmenten), die zwischen den Längsträgern verlaufen. Die Platten werden an die Längsträger, die Außenhautbeplattung und den Innenboden angeschweißt. Neben Erleichterungslöchern

sind zudem Ausschnitte für Profile und Beulsteifen vorhanden.

6.1.2 Bauraum und Simulationsmodell Doppelboden

Bodenwrangen

Der Doppelboden wird im Bereich von Spant 85 bis 93 untersucht, Abbildung 6.2.

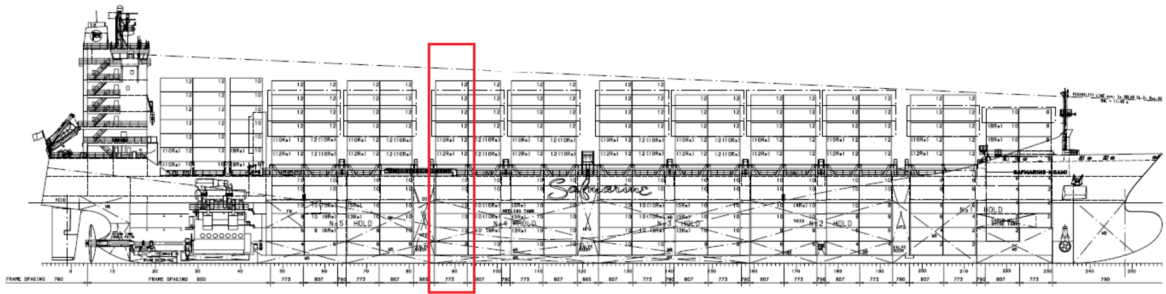


Abbildung 6.2: Markierung Spant 85 bis 93 im Seitenriss

Auch wenn der Abstand einzelner Spanten im globalen Schiffskörper zwischen 790/773/807/985mm variiert, ist in dem betrachteten Bereich der Spantabstand konstant bei 773mm. Auf Spant 85 ist eine wasserdichte Bodenwrange angeordnet die sich direkt unter einem Querschott befindet. Für Spant 89 ist eine offene Bodenwrange vorgesehen. Der zu untersuchende Bereich auf Spant 93 ist als volle Bodenwrange mit Erleichterungslöchern ausgeführt. Die Blechdicke des Spantes 93 beträgt 12mm und läuft von der Mitschiffsebene bis zur Laderaumwand. Es wird davon ausgegangen, dass das Schiff symmetrisch zur Mitschiffsebene ist. Als weitere Vereinfachung soll davon ausgegangen werden, dass die betrachtete halbe Containerbay, (von Spant 85 bis 93) unverändert über die Länge, dem Spant 93 entspricht. Der Aufbau der Seitenwand soll entsprechend des Hauptspantquerschnittes ausgeführt sein. Da das Schiff sich in diesem Bereich nur wenig verändert, wird angenommen, dass das Schiff in diesem Abschnitt parallel ist. Damit kann dann auch der Affenfelsen, welcher in dieser Sektion vorhanden ist, vernachlässigt werden. Auch auf kleinere Ausschnitte, wie Wasserlauflöcher und Rohrausschnitte sowie auf die Geometrie des offenen Spantes 89, wird nicht näher eingegangen. Die einzelnen Wrangensegmente sind mit Stützblechen, sogenannten Beulsteifen, versehen. Deren Steg ist 150mm hoch und die Blechdicke ist ebenfalls 12mm. Der Doppelboden ist 1480mm hoch und der Abstand von Mitschiffsebene und Seitenverband ist 12735mm.

Längsträger

Im Doppelboden sind vom Mittellängsträger bis zum Seitenverband sechs durchgehende Längsträger, an die die Segmente der Bodenwrangen angeschweißt sind, vorgesehen. Sie

werden mit L0, L10,..., L50 bezeichnet. Bis auf L50 sind alle Längsträger mit 2 Längsspanten versehen, die dem Plattenbeulen entgegenwirken und als Hollandprofile (kurz HP) ausgeführt sind. Tabelle 10 erläutert Position, Materialdicken und verwendete Profilgrößen im globalen Schiffskoordinatensystem. Die Längsspanten sind nur auf L0 steuerbordseitig ansonsten backbordseitig jeweils auf der Höhe Z=465mm und Z=960mm angeschweißt.

Tabelle 10: Längsträger im Detail

Längsträger	Blechdicke [mm]	Y Position [mm]	Profil
L 0	13,0	0	HP 140x7
L 10	10,5	2620	HP 140x7
L 20	12,0	5140	HP 140x7
L 30	11,0	7630	HP 200x11
L 40	10,0	10130	HP 140x7
L 50	14,0	12735	-

Längsspanten, Innenboden und Außenhautbeplattung

Für Mitschiffs von Spant 85+1000 mm bis Spant 157-1000 mm sind aufgrund globaler Längsbiegebelastung erhöhte Blechdicken vorgesehen, für die Innenbodenbeplattung 14 bis 15 mm und für die Außenhautbeplattung über die Höhe variierend 17 bis 19,5 mm.

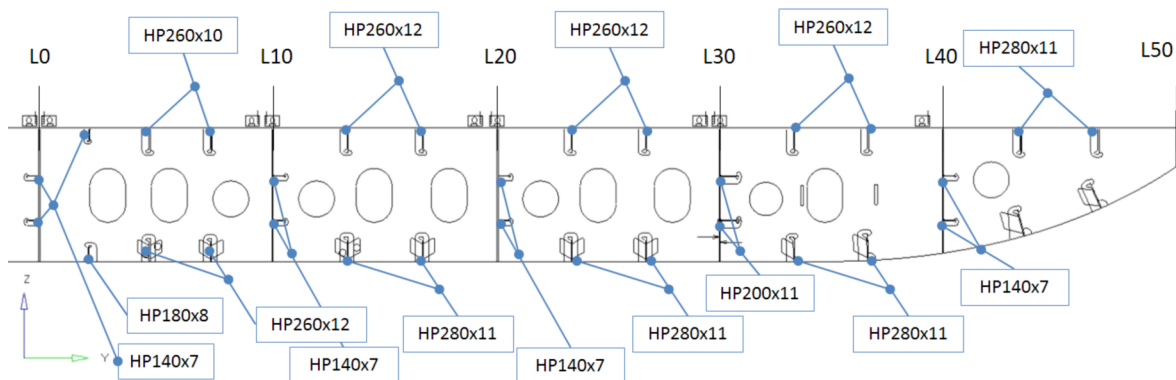


Abbildung 6.3: Anordnung der Segmentierung und Raster der HP-Profile

Auf Innenboden und Außenhaut sind ebenfalls Längsspanten angeordnet, die die globale Biegebeanspruchung aufnehmen und lokales Ausbeulen der Flächentragwerke minimieren sollen. Zur Verdeutlichung der Anordnung der Längsspanten dient Abbildung 6.3. Die genauen Abmaße der auch Wulstflachstahl genannten Hollandprofile sind der EN 10067 entnommen.

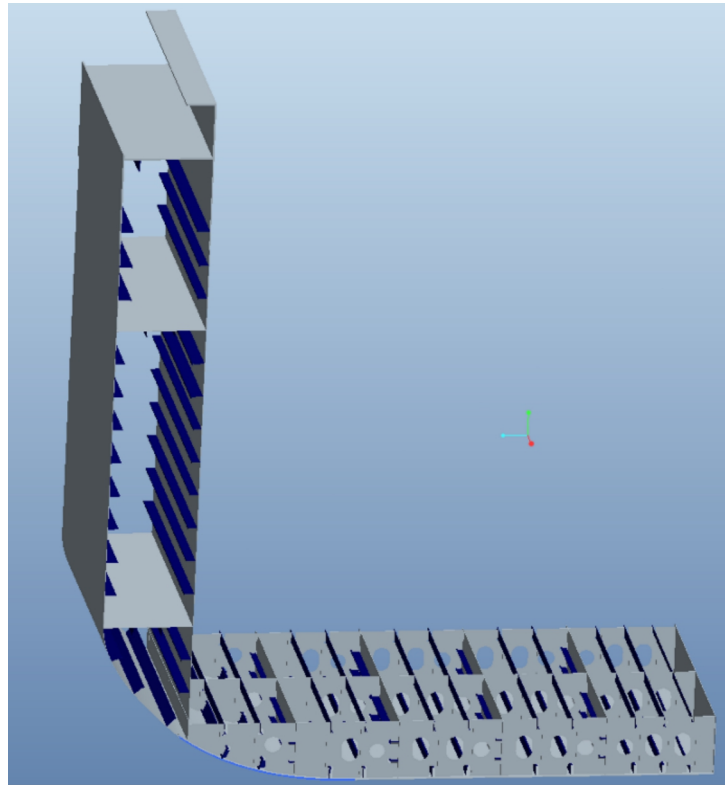


Abbildung 6.4: Geometriegrundlage für Bauraum und Simulationsmodell der Doppelbodensektion

Aus den beschriebenen Bauteilen der Doppelbodensektion, der Seitenwand sowie der Schottwand bei Spant 85 setzt sich die Geometrie des Simulationsmodells zusammen, Abbildung 6.4.

Symmetrie

Zu erkennen ist auch eine Ausnutzung von Symmetrie, da die Doppelbodensektion nur backbordseitig betrachtet wird. Dies ist nicht ganz der Realität entsprechend. Die Abweichungen beschränken sich jedoch auf kleinere Details, wie zum Beispiel das steuerbordseitige Anschweißen von Längsspannten auf dem Mittellängsträger. Daher ist diese Vereinfachung zulässig und minimiert außerdem die Rechenzeit enorm.

Vernetzungsparameter

Die generierte Geometrie wird in finite Elemente aufgeteilt. Tragende Strukturelemente der Geometrie sind aus Fertigungssicht stahlbauliche Grobbleche. Da diese Bleche große Längen- und Breitendimensionen gegenüber ihrer Dicke aufweisen, ist es zweckmäßig, Schalenelemente zu verwenden. Für die Vernetzung der Flächentragwerke im numerischen Modell werden einfache Schalenelemente erster Ordnung verwendet. Dazu stehen für den Gleichungslöser *Optistruct*[®] Elemente des Typs CQUAD4 und CTRIA3 zur Verfügung. Auch die gebauten Längsspannten werden durch Schalenelemente modelliert. Für Details

der verwendeten Elementtypen sei auf das Manual [2] verwiesen.

Tabelle 11: Spezifikation der Vernetzungsparameter 3D Bodenwrange

Bezeichnung	Elementtyp	Elementkantenlänge Ø	Elementanzahl	Knoten- anzahl
CTRIA3	Lineares Dreieckselement	60 mm	1027	2787
CQUAD4	Bilineares Viereckselement	60 mm	86624	86723

Bei der Vernetzung wurde darauf geachtet, die Anzahl an Dreieckselementen so gering wie möglich zu halten. Die Verwendung dieser Elementtypen lässt sich aber beispielsweise an Verrundungen oder aufgrund der hohen Netzdichte auf Spant 93 nicht ganz vermeiden. Das Ausgangsmodell der Doppelbodensektion enthält circa 91000 Elemente wobei nur rund 1% davon als Trias definiert sind. Damit kann ausgeschlossen werden, dass die numerisch steiferen Dreieckselemente die Berechnung negativ beeinflussen. Weiterhin werden wichtige Qualitätskriterien für die Elementierung eingehalten, Tabelle 12.

Tabelle 12: Ergebnisse programminterner Element-Qualitätsprüfung

Qualitätskriterium	Unterer Grenzwert	Fehlerrate Elementzahl	Fehlerrate prozentual
Seitenverhältnis (Aspect Ratio)	5,0	3	0,0
Winkel Trias	30°	23	0,0
Winkel Quads	40°	18	0,0
Jacobi-Determinante	0,6	151	0,2
Verzerrungswinkel (Skew)	40°	39	0,0

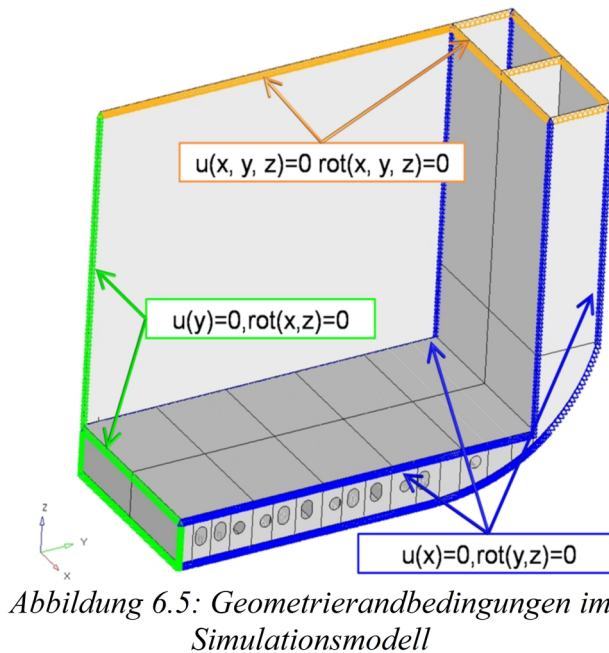
Im Verlauf der Berechnungen ist es erforderlich, das numerische Modell zu modifizieren. Dazu werden teilweise die Struktur verändert und betreffende Komponenten neu vernetzt. Die Anzahl der Elemente ist dabei gleich oder wird kleiner und alle Qualitätskriterien werden ebenso eingehalten, so dass auf eine detaillierte Dokumentation der Vernetzung der modifizierten Modelle verzichtet wird.

Geometrische Randbedingungen

Die geometrischen Randbedingungen entsprechen den Lagerbedingungen mit festgelegten Knotenverschiebungen und -rotationen. Die beschriebene Symmetrienausnutzung muss in den Randbedingungen Berücksichtigung finden. Daher werden auf die Randbereiche des Mittellängsträgers und des Schotts Symmetrierandbedingungen bezüglich der globalen x-z-Ebene aufgebracht. Das bedeutet, dass die Verschiebungen in y-Richtung und die Rotationsfreiheitsgrade um die x- und z-Achse unterbunden werden. Weiterhin werden

Symmetrierandbedingungen bezüglich der globalen y-z-Ebene auf Spant 85 und 93 aufgebracht. Dies entspricht nicht der Realität, da die in Schiffslängsrichtung angeschlossenen Strukturelemente nicht exakt dem modellierten Bereich entsprechen. Weil aber zumindest eine hinreichende Ähnlichkeit besteht, kann somit die Anbindung der angeschlossenen Sektionen, an die Außenhaut-, die Boden- und die Innenwandbeplattung in Achter- und Bugrichtung, simuliert werden. Dazu werden bei den Rändern der Bodenwange sowie dem Rahmenspant auf Spant 85 und 93 die Verschiebungen in x-Richtung und die Rotationen um die y- und z-Achse unterbunden.

Auf Höhe des Decks zwei werden alle Knoten fest eingespannt. Dies ist eine sehr starke Vereinfachung des physikalischen Problems, denn in der Struktur des Schiffes ist an keiner Stelle eine quasi unendlich steife Anbindung vorhanden. Die feste Einspannung ist jedoch in einem ausreichenden Abstand zur betrachtenden Bodenwange auf Spant 93 aufgebracht. Somit kann der Einfluss dieser Idealisierung bis zur Bodenwange problemlos abklingen, so dass diese Vorgehensweise zulässig ist. Abbildung 6.5 visualisiert die beschriebenen Randbedingungen; dabei ist die Symmetrie in Querrichtung grün, die Symmetrie in Längsrichtung blau und die feste Einspannung orange eingefärbt.



Natürliche Randbedingungen

Bei der Doppelbodensektion treten zwei parallele Lastfälle auf; die äußere Belastung p_B auf die Außenhaut durch den Wasserdruck sowie die als arbeitsäquivalente Knotenkräfte aufgetragenen Containerlasten. Die Entwurfsbelastung für den Wasserdruck ist aus den Regelwerken der Klassifikationsgesellschaft *Germanischer Lloyd* [29] entnommen:

$$p_B = 10T + p_0 \cdot c_f \quad (6.1)$$

Diese ist abhängig vom Tiefgang T , der dynamischen Grundbelastung p_0 sowie einem Verteilungsfaktor c_f . Nach Klasseregeln sind für diesen Schiffstyp $p_B = 0.142 \text{ N/mm}^2$ anzusetzen. Berücksichtigt sind neben dem statischen Wasserdruck auch ein dynamischer Erhöhungsanteil von ca. 24%. Die Außenhautbelastung wird als Flächenkraft auf die Elemente der Außenhaut aufgebracht. Die Belastung der Außenhaut am Seitenverband wird vernachlässigt, so dass im Kimmradius nur die Elemente bis zur Innenbodenhöhe beaufschlagt werden.

Parallel dazu wird die Sektion durch Containerlasten beansprucht. Im Modell wird weder die exakte Geometrie der Containerfußpunkte noch die Fundamentierung durch Verstärkungsstrukturen wie z.B. Stützbleche mit abgebildet. Die aus dem Eigengewicht der Container resultierende Belastung wird lediglich über die Auflagerflächen der Containereckbeschläge eingebracht. In dem betrachteten Bereich von Spant 85 bis 93 können nur 20 Fuß ISO-Container aufgesetzt werden. Wird ein 40 Fuß Container verwendet so ist lediglich Spant 85 belastet und Spant 93 bleibt unbeanspruch. Entsprechend den Angaben der Bauwerft liefert das Gewicht aus 6 gestapelt TEU-Containern die Belastung der Fußpunkte, Abbildung 6.6. So wirken auf einen Fußpunkt $40,5 \text{ t}$ Gewicht und ergeben bei einer Eckbeschlagsfläche von $211 \text{ mm} \times 178 \text{ mm} = 37558 \text{ mm}^2$ eine Flächenlast von $10,58 \text{ N/mm}^2$. Das Netz des FE-Modells wird so partitioniert, dass diese Flächen entsprechend ihrer Abmaße vorliegen. Über die halbe Breite des Schiffes sind 5 Containerstapel vorgesehen.

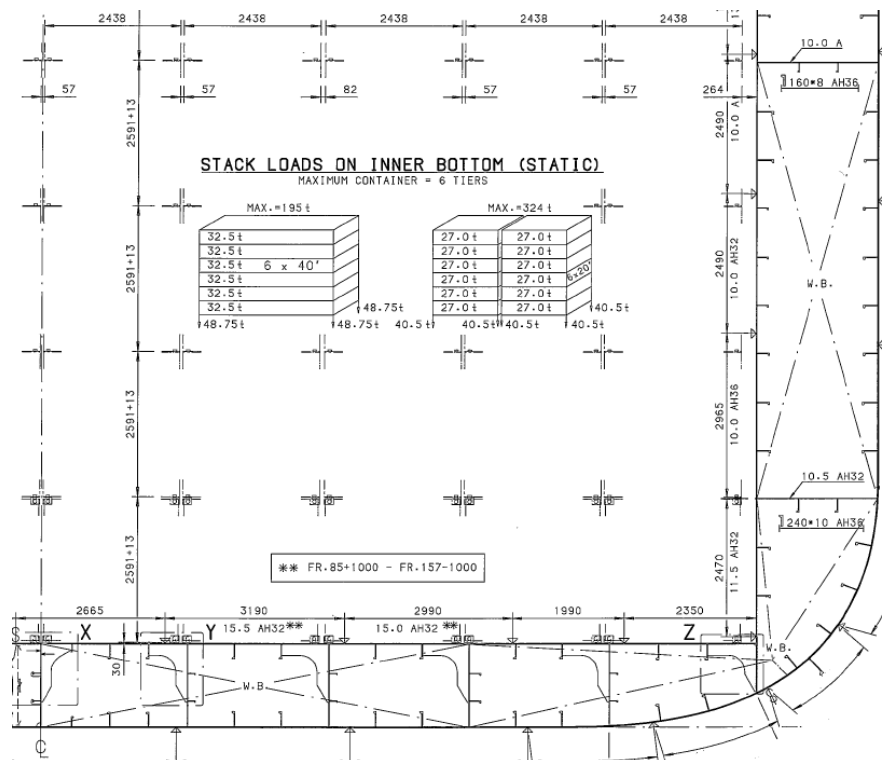


Abbildung 6.6: Lage der Containerfußpunkte

In Längsrichtung werden die Fußpunkte mit einem Abstand von 200mm von Spant 85 in Bugrichtung auf den Innenboden aufgebracht. Die Fußpunkte im Bereich Spant 93 liegen außerhalb des modellierten Bereichs und wurden daher bezüglich Spant 93 gespiegelt und im Abstand von 200mm von Spant 93 nach achtern angeordnet. Diese Abweichung zur realen Konstruktion wird notwendig, um den Einfluss der Containerlasten auf Spant 93 zu berücksichtigen, ohne das Modell zu erweitern. Da diese Annahme jedoch eine Überhöhung der Belastung darstellt, wird die Containerlast bei Spant 93 um 5% verringert. Also resultieren Flächenlasten von $10,05\text{ N/mm}^2$ aus den Containerfußpunkten auf Spant 93, Abbildung 6.7.

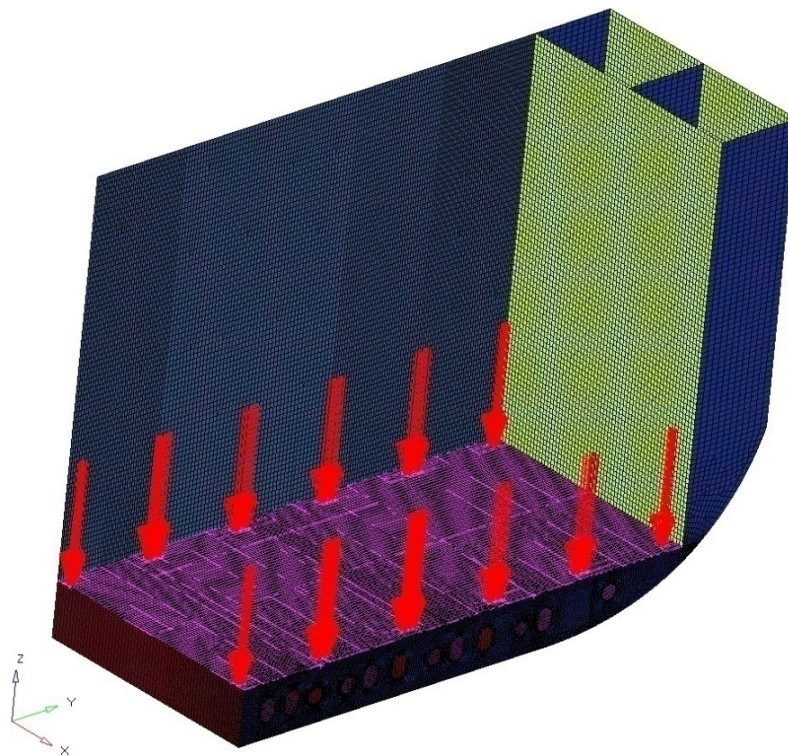


Abbildung 6.7: Arbeitsäquivalente Knotenkräfte aus Containerauflast

Matériaualeigenschaften

Die Bauteile der Doppelbodensektion bestehen aus dem Konstruktionswerkstoff Stahl. Damit werden die bekannten Kennwerte in das Simulationsmodell implementiert.

Tabelle 13: Werkstoffkennwerte der Doppelbodensektion

Kennwert	
Elastizitätsmodul	$E = 210\,000\text{ N/mm}^2$
Querkontraktionszahl	$\nu = 0,3$
Dichte	$\rho = 7,85 \cdot 10^{-9}\text{ kg/mm}^3$

Bauraummodell

Aus dem vorbereiteten finite Elemente Modell wird nun der Bauraum definiert. Wie bereits beschrieben ist das Optimierungsziel die Massereduzierung der vollen Bodenwrange auf Spant 93. Daher werden genau die 2D vernetzten Segmente dieser Wrange als Entwurfsraum (design space) definiert. Dabei wird in zwei Stufen vorgegangen. Zunächst wird ein Modell 1 getestet, dass im Initialzustand der konventionellen, gebauten Bodenwrange entspricht. Zur Erweiterung des Entwurfsraumes respektive Erhöhung der Freiheitsgrade der Optimierung wird als Modell 2 die Wrange sämtlich ohne Perforationen als Entwurfsraum definiert und der Entwurfsraum komplett mit Material gefüllt. Dem Algorithmus wird so mehr Freiheit gegeben, an signifikanten Stellen Material hinzuzufügen oder abzutragen. Abbildung 6.8 zeigt beide Modelle. Dabei ist zu beachten, dass das Bauraummodell dem kompletten FE-Modell entspricht, das den Entwurfsbereich inkludiert.

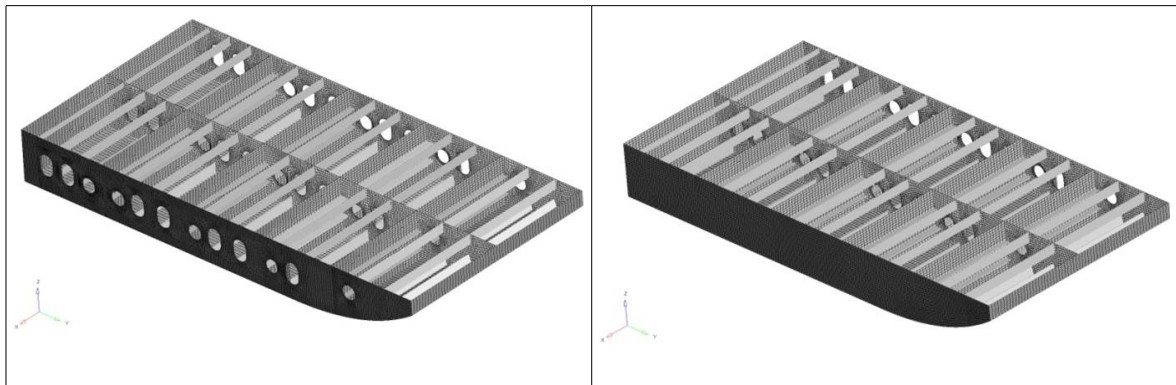


Abbildung 6.8: Bauraummodelle der Bodenwrange 93

6.1.3 Optimierungsmodell und -ergebnisse

Mit den zwei unterschiedlichen Modellen der Doppelbodensektion wird jeweils eine Topologieoptimierung durchgeführt und mit den Ergebnissen eine neue Konstruktion erstellt, die im Anschluss mit der Startkonfiguration hinsichtlich Vergleichsspannungen und Deformationen verglichen werden kann, vgl. Kapitel 7.1. Die modifizierten Startentwürfe müssen aufgrund ihrer veränderten Geometrie neu vernetzt werden. Dabei werden jeweils weder die in Abschnitt 6.1.2 erwähnten Qualitätskriterien unterschritten noch die Elementanzahl bedeutend erhöht.

Für die Optimierungsprozedur gilt wiederum das Vorgehen entsprechend der Angaben zur eigenen Programmierung aus Abschnitt 5.2.3. Die Problembeschreibung im gewählten Präprozessor *Hyperworks*® verwendet dabei folgende Begrifflichkeiten:

1. Identifikation und Erstellen des Entwurfsraumes (Design Space)
2. Definition der Entwurfsvariablen (Design Variable)

3. Definition der Zustandsvariablen - Systemverhalten (Responses)
4. Definition der Zielfunktion (Objective Function)
5. Definition Restriktionen (Constraints)
6. Festlegung weiterer Parameter
7. Festlegung eines Konvergenzkriteriums
8. Optimierungsrechnung
9. Ergebnisinterpretation und Designvorschlag

Im Solver *Optistruct*[®] werden die auf Gradienten basierten Optimierungsverfahren verwendet, Abschnitt 4.4.2. Der Lösungsalgorithmus dabei ist die SIMP-Methode (Abschnitt 4.4.4).

Den Berechnungen liegt eine Basisgröße der finiten Elemente respektive Designvariablen von 50mm zu Grunde. Da beim ersten Modell durch die Perforationen bereits eine klare Struktur vorgegeben ist und nur wenig Volumen entfernt wird, werden hier sehr kleine Strukturen in Bezug auf zusätzliche Randbedingungen zugelassen, um eine angemessene Interpretation zu erlauben. Für das erste Modell wird demnach eine minimale Strukturgröße (minimum member size control) in Breitenrichtung von 100mm zugelassen. So müssen nur zwei Basiselemente benachbart verbleiben. Beim zweiten Modell soll wesentlich mehr Material entfernt werden und dem Algorithmus werden mehr Freiheiten hinsichtlich der Strukturfindung ermöglicht. Um dennoch in Bezug auf die verbleibende Struktur klare Aussagen zu erreichen, muss die Restriktion geändert werden. So wird eine minimale Strukturgröße von 200mm eingestellt. Filigrane Strukturen mit nur vier benachbarten Basislementen können sich ausbilden und der Schachbretteffekt wird verhindert. Die gemachten Definitionen der Optimierungsvariablen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Tabelle 14: Parameterdefinition für die Optimierungsmodelle 1 und 2 der Bodenwrange

Optimierungsvariable	Beschreibung	Wert
<i>Modell 1</i>		
„Design Variable“	(Schalen-) Elemente der Bodenwrange auf Spant 93	6549 (355Tria, 6194Quad)
„Responses“	Definition globaler Nachgiebigkeit (compliance) und Volumen des Entwurfsraumes (volumefrac) für jeden Einzelschritt	
„Objective“	Über alle Lastfälle gewichtete (auch unterschiedliche Wichtung über separate Eingabe mgl.) Nachgiebigkeit	
„Constraints“	Definition der Volumen(-ungleichheits-)restriktion	0,8

	(Volfrac) über Prozentangabe → hier „verbleibende“ maximal 80% der Designvariablen	
„Parameter Size Control“	Minimum member size control, Maß der Breite [mm] der sich stabmäßig herausbildenden Struktur sukzessive Anzahl der in Breitenrichtung erforderlichen nebeneinanderliegenden Elemente	100
Parameter „Discrete“	Definition des Bestrafungsexponenten p bei Anwendung der SIMP-Methode	≤ 3
Parameter „Desmax“	Definition maximal möglicher Anzahl der Iterationen	80
Abbruchkriterium „Objtol“	Definition des Abbruchkriterium für die Genauigkeit der Optimierung	0,005
<i>Modell 2</i>		
„Design Variable“	Finite Elemente im Bauraum	4405 (41Tria, 4364Quad)
„Constraints“	Volumenrestriktion → Reduktion auf 60% mittragender Elemente	0,6
„Parameter Size Control“	Mindestbreite sich herausbildender Skelettstrukturen	200

Ergebnisse Modell 1

Die richtige Interpretation der Ergebnisse gehört zu den schwierigsten Aufgaben der Topologieoptimierung. Berechnungsingenieur und Konstrukteur sollten diese möglichst gemeinsam analysieren. Wichtigste Visualisierung ist eine Dichteverteilung. Dabei handelt es sich aber nicht um die tatsächliche Materialdichte, sondern nur um eine reine Rechengröße, die direkt mit dem E-Modul verknüpft ist, vgl. Kapitel 4.4.4. Elemente mit einer Dichte nahe Null tragen so gut wie nichts zur Steifigkeit der Struktur bei. Elemente mit einer Dichte von eins hingegen besitzen die voll definierte Steifigkeit des Grundmaterials. Die optimierten Modelle erhalten im Designraum dann die Dichteverteilung als Beschreibung einer reinen Rechengröße. Das Volumen wird in gleicher Weise in Relation zur Elementdichte gesetzt. Mit diesem Grundverständnis wird die Auswertung visuell möglich. So zeigt Abbildung 6.9 das Ergebnis der Dichteverteilung nach der letzten Iteration der Topologieoptimierung.

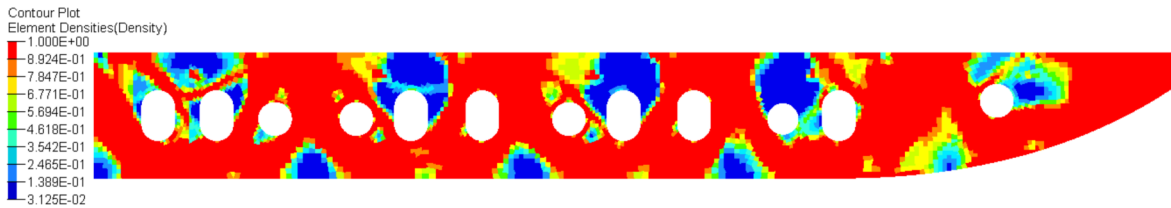


Abbildung 6.9: Dichteverteilung Bodenwrange 3D

Das Resultat der Optimierung hält demnach die geforderte Volumenrestriktion von $V_{opt} \leq 0.8 \cdot V$ ein, ohne dass ein Element entfernt werden musste. Aber es zeigt sich auch, dass aufgrund der relativ geringen Volumenrestriktion, mit einer Mindestreduzierung von 20%, nur wenigen Elementen eine geringe Dichte zugewiesen wird. Um so deutlicher wird dies, wenn man im Postprozessor alle Elemente mit einer Dichte kleiner 0,35 ausblendet, Abbildung 6.10. Die Festlegung des Dichtewertes obliegt dabei dem Anwender, was wiederum eine Bestätigung des Kooperationsgebotes von Berechnungs- und Konstruktionsingenieur darstellt. Generell sollte so gewählt werden, dass eine Nachkonstruktion möglich ist. In der Regel kristallisieren sich einfachere Strukturen heraus, je mehr Elemente man ausblendet. Zur besseren Interpretation trägt auch die farbliche Darstellung bei die der jeweiligen Konzentration eine Farbe zuordnet sowie eine optische Kantenglättung.

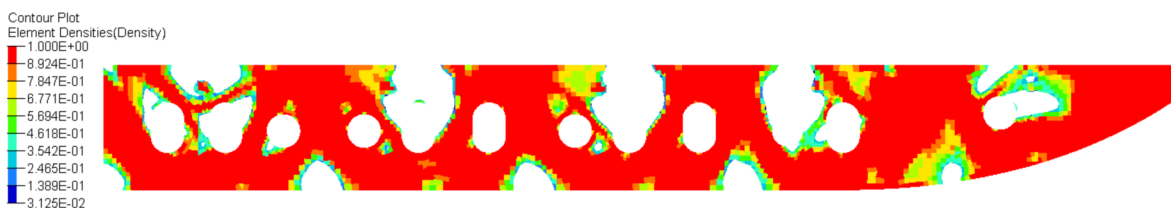


Abbildung 6.10: Dichteverteilung Bodenwrange 3D mit Elementausblendung

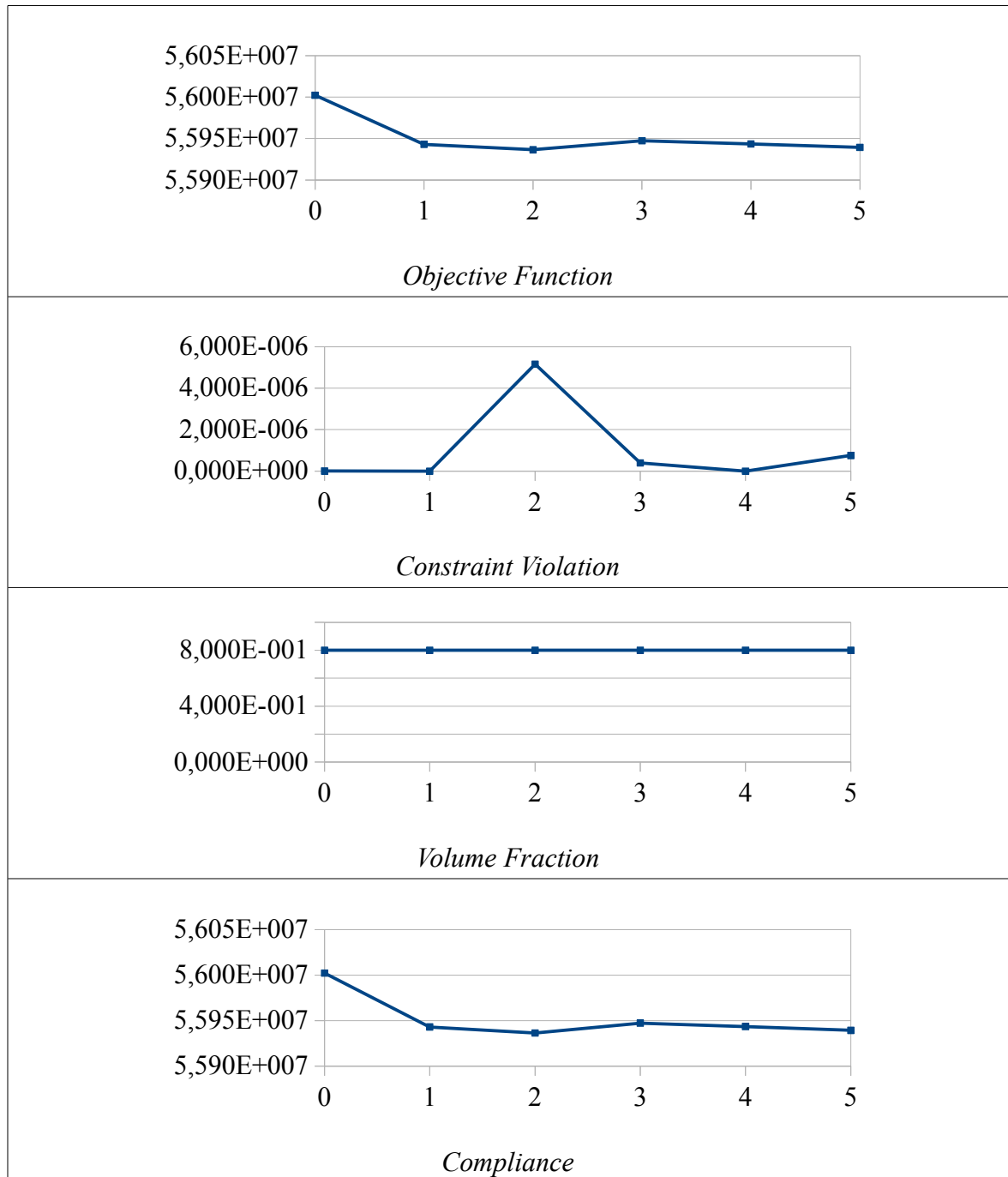
Das Ergebnis konvergiert bereits nach 5 Iterationen, vgl. Tabelle 15. Das ist besonders schnell und durch die unüblich geringe Volumenrestriktion verursacht.

Ohne Einbeziehung der zusätzlichen Nebenbedingung zum Mindestmaß, der als Nachbarn eingestuft Elemente, würde sich die Anzahl noch weiter verringern. Eine Vergleichsrechnung ohne diese Parameterdefinition konvergierte bereits nach 2 Iterationen. Im Verlauf ist auch deutlich der Strafexponent zu erkennen. So bildet sich mit sukzessiver Werterhöhung des Penalty-Faktors p ein Peak in der Nachgiebigkeit heraus. Im Diagramm zum Iterationsverlauf der Zielfunktion (Objective Function), Tabelle 15, sind bei näherer Betrachtung zwei Phasen zu erkennen. So wird bis Schritt 3 mit $p=2$ und folgend mit dem Endwert $p=3$ gerechnet.

Als Lösungserzeuger für das Problem wird die in Kapitel 4.4.3 vorgestellte *Method of Feasible Direction* verwendet. Es zeigt sich, dass diese einfache direkte Methode robust für die Anwendung ist. Obwohl eine Verletzung der Restriktion auftritt, vgl. zweite Zeile der

Tabelle15, läuft die Suchrichtungsbestimmung sukzessive der Algorithmus weiter bis zur Konvergenz. In Bezug auf die Volumenrestriktion ist zu erkennen, dass, obwohl Ungleichheitsrestriktion, die möglichen 80% fortlaufend für das Ziel maximaler Steifigkeit ausgenutzt werden.

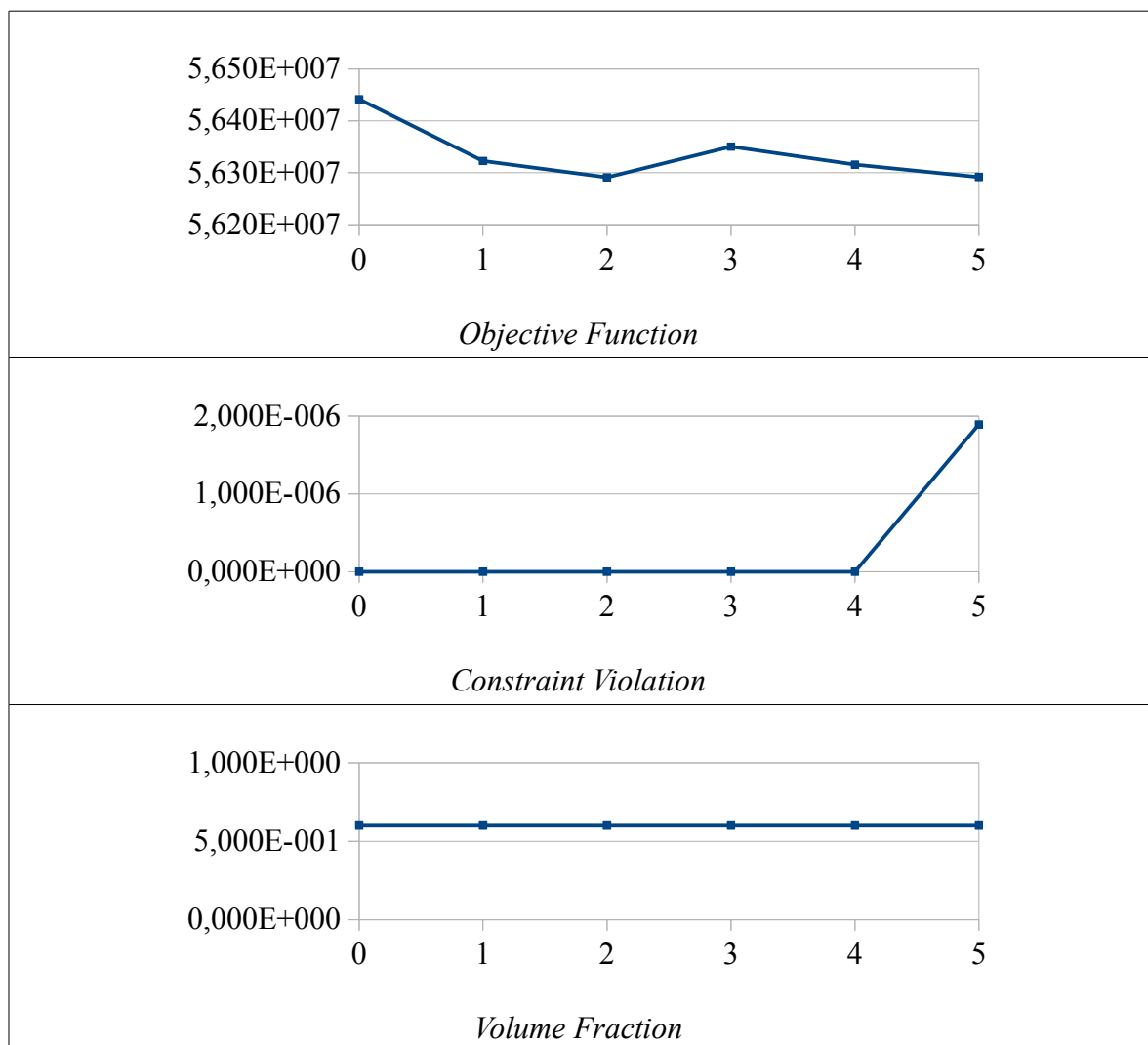
Tabelle 15: Übersicht über den Iterationsverlauf für die Bodenwrange Modell 1



Ergebnisse Modell 2

Dieses Modell besitzt deutlich mehr Entwurfsraum bei gleichzeitig weniger Entwurfsvariablen (finiten Elementen). Die Bodenwrange ist initial komplett gefüllt, die Volumenrestriktion auf 60 Prozent angehoben. Die geringe Elementzahl gepaart mit der weiterhin geringen Volumenrestriktion sorgt für eine abermals schnelle Ergebniskonvergenz. Das Abbruchkriterium wird bereits nach 5 Iterationen erreicht, Tabelle 16. Mit zunehmendem Verlauf steigt die Neigung an die Grenzen der Restriktionen zu gehen, sie werden aber nie verletzt. Insgesamt zeichnet sich bei den Iterationsverläufen ein dem Modell 1 ähnliches Bild ab. Das Absolutniveau der Zielfunktion, die globale Nachgiebigkeit, erreicht aber selbstverständlich nicht ganz die Werte vom konservativeren ersten Modell.

Tabelle 16: Übersicht über den Iterationsverlauf für die Bodenwrange Modell 2



Die angenommene Konsequenz hin zu einem kompletten Neudesign bewahrheitet sich bei der optischen Analyse, Abbildung 6.11. Schon vor einer Konstruktionsüberführung ist eine

weitere Volumenreduktion und damit Massereduktion zu erkennen.

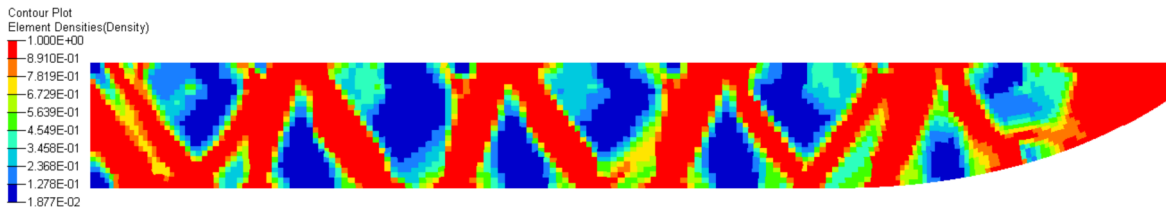


Abbildung 6.11: Dichteverteilung Bodenwrange 3D Modell 2

Im Hinblick auf einen einfach strukturierten Designvorschlag und einer hinreichenden Volumenminimierung werden auch bei Modell 2 im zweiten Schritt alle Elemente mit einer Dichte kleiner 0,5 ausgeblendet, Abbildung 6.12. Diese Vorgehensweise erlaubt eine schnellere Nachbearbeitung der Geometrie und anschließende Vernetzung, weil weniger Material verwendet wird.

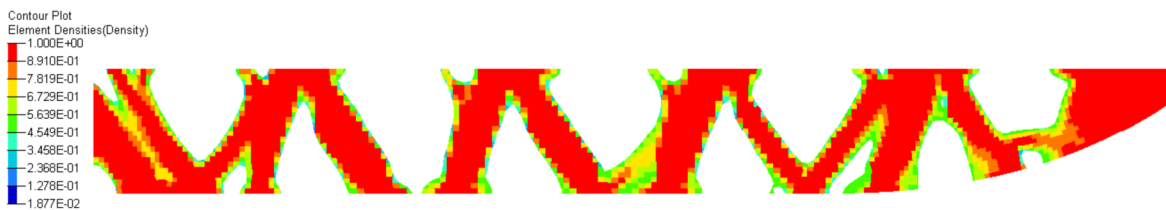


Abbildung 6.12: Dichteverteilung Bodenwrange 3D Modell 2 mit Elementausblendung

6.1.4 Designvorschlag und Konstruktionsüberführung

Aus den erzielten Postprocessing-Ergebnissen beider Modelle lassen sich nun Designvorschläge erarbeiten.

Modell 1

Beim Modell 1 wurden durch die bereits vorhandene klare Struktur nur wenig Volumen bzw. mittragende Elemente entfernt. Die Idee ist, die vorgegebenen Perforationen anhand der Dichteverteilung mit Elementausblendung nach Abbildung 6.13 zu erweitern. Weitere Freischnitte werden stark reduziert, um komplette Anschlussfähigkeit an Längsbauteile weiterhin zu gewährleisten. Nach einer Ergebnisglättung sowie dem Löschen eventuell vorhandener „Elementinseln“ lässt sich ein Konstruktionsvorschlag visualisieren:

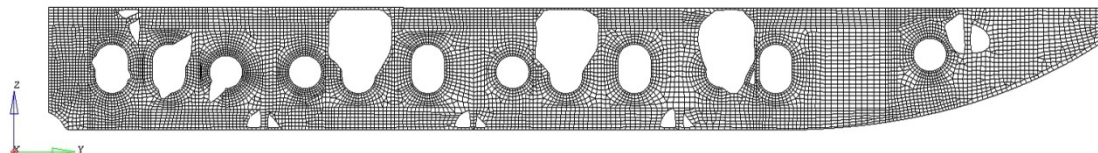


Abbildung 6.13: Konstruktionsvorschlag Bodenwrange 3D Modell 1

Wie im Vorhinein beschrieben, besteht die offene Bodenwrange auf Spant 93 aus 5 Segmenten, die jeweils an den anliegenden Längsträgern angeschweißt werden. Die

Anschlüsse werden komplett erhalten. Zudem ist zu erkennen, dass am Konzept der rückseitig gegengeschweißten Beulsteifen festgehalten werden kann; abhängige Bemessungsanpassungen o.ä. sind nicht erforderlich. Eine Änderung durch vorsichtige Erweiterung der Perforationen ist auch aus primärer fertigungstechnischer Sicht möglich. Dazu werden die neu geschaffenen Perforationen in der CAD-Umgebung hinterlegt. Die auf Werften vorhandenen Brennschneideinrichtungen sind dann in der Lage, jegliche, also auch diese Schneidwege, am ebenen Paneel zu realisieren. Der tabellarische Vergleich zeigt eine erzielte Gewichtsersparnis von 160kg auf:

Tabelle 17: Rohmassenersparnis bei Konstruktionsvorschlag 1 für Bodenwrange 93

	Volumenreduktion [%]	Materialdichte [kg/m³]	Masse [kg]
Ausgangsdesign Bodenwrange 93		7850	1465
Konstruktionsvorschlag Modell 1	11,00	7850	1305

Eine Spannungsrestriktion ist in diesem Modell nicht realisiert. Die Auswirkungen auf das Festigkeitsverhalten die sich aus dem Konstruktionsvorschlag ergeben, werden daher unter dem Aspekt der Validierung im folgenden Kapitel 7 näher erläutert.

Modell 2

Im Modell 2 wird in Bezug auf Massereduktion ein größeres Potential gesehen. Daher wird im Folgenden der Fokus auf das Modell 2 gelegt. Durch die größeren Freiheiten in der Strukturfindung, sollte hier mehr Flexibilität bei der Erarbeitung eines Konstruktionsvorschlages möglich sein. Um dem schiffbaulichen Fertigungsprozess zu genügen, könnte man annehmen, dass in den Randbereichen der Wrangensegmente ein Minimum an Material zu erhalten ist, um die Anbindung an angrenzende Strukturelemente wie Innenboden, Längsträger oder Außenhaut zu sichern. Mit Glättung des Ergebnisplots der Dichteverteilung entsprechend Abbildung 6.12, entsteht ein erster Konstruktionsvorschlag, Abbildung 6.14.

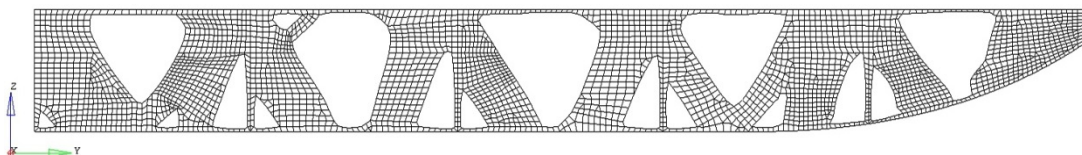


Abbildung 6.14: Konstruktionsvorschlag 1 Bodenwrange 3D Modell 2

Aber es zeigt sich, dass die Stege an den Lochrändern teilweise nur eine Höhe von 30mm aufweisen. Fertigungsgerecht, gerade im Hinblick auf das Schweißen, ist das nicht. Daher

werden noch einmal leichte Veränderungen vorgenommen und zu einem geglätteten Konstruktionsvorschlag für eine offene Bodenwrange zusammengefügt:

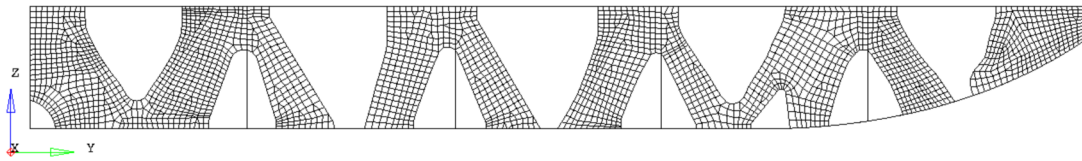


Abbildung 6.15: Konstruktionsvorschlag 2 Bodenwrange 3D Modell 2

Dabei sind die Anbindungen an die Längsträger für jedes Segment gegeben, aber nicht mehr über die gesamte Doppelbodenhöhe realisiert. Durch zusätzlich größere Ausrundungsradien wird zudem eine homogenere Berandungskontur der Materialaussparungen erreicht. Bemerkenswert an diesem finalen Vorschlag ist, dass hier klar der Ausgangskonfiguration widersprochen wird (Abbildung 7.5). So werden gerade bei den ursprünglichen Perforationen hohe Elementdichten errechnet, aus denen diagonale Konturen resultieren. Dennoch ist es in diesem Konstruktionsvorschlag sowohl konstruktiv als auch fertigungstechnisch immer noch möglich, an der Rückseite Beulsteifen anzuschweißen. Dabei bleibt gegenüber dem Original die Anzahl erhalten, vgl. Abbildung 6.16. Technologisch sinnvoll verlaufen sie parallel zu den Perforationskonturen.

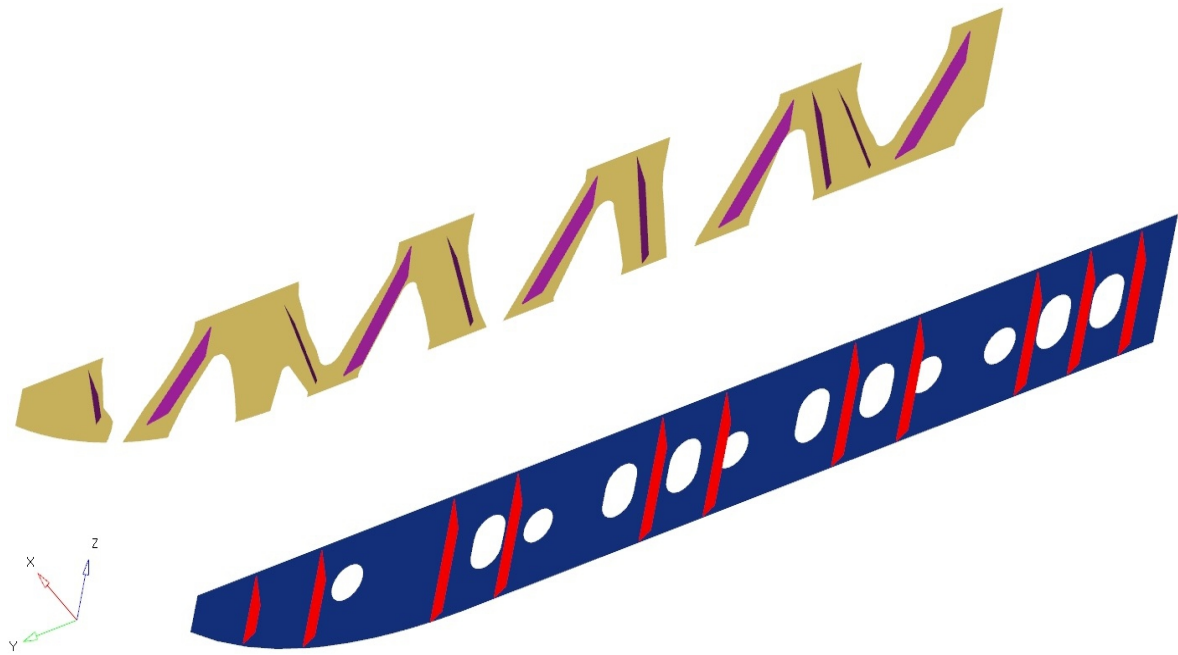


Abbildung 6.16: Vergleich der Anordnung Beulsteifen für Modell 2 und Original

Der Vergleich der Masse Stahl für die unverteiften Plattensegmente der Bodenwrange führt zu einer erheblichen Einsparung, Tabelle 18. So kann bei der Bodenwrange dieses Typs gegenüber der Ausgangskonstruktion ca. 578kg gespart werden. Da dieser offene Bodenwringentyp vielfach im Doppelboden vorhanden ist, steckt in einer Realisierung enormes Potential. Eine direkte Realisierung dieses Konstruktionsvorschlages ist aber nicht

ohne weitere Untersuchungen möglich. Beispielsweise entsteht global betrachtet an manchen Stellen eine Vergrößerung der ununterstützten Länge der Längsträger. Der Kostenvorteil der Bauwerft überwiegt aber bei weitem den Aufwand der Konstruktionsabteilung. Beim Bau einer Serie, wie bei Containerschiffen durchaus üblich, vervielfacht sich das Potential noch einmal.

Tabelle 18: Rohmassenersparnis bei Konstruktionsvorschlag 2 für Bodenwrange 93

	Volumenreduktion [%]	Materialdichte [kg/m³]	Masse [kg]
Ausgangsdesign Bodenwrange 93		7850	1465
Konstruktionsvorschlag Modell 2	39,50	7850	789,5

Über Auswirkungen auf das Festigkeitsverhalten dieses Entwurfs gegenüber der konventionellen Bodenwrange wird in Kapitel 7 im Rahmen einer validierenden Untersuchung diskutiert. Dabei bildet der Konstruktionsvorschlag auf Basis des Modells 2 das Hauptaugenmerk der Betrachtungen.

6.2 Topologieoptimierung als Konzeptdesign am Beispiel des Vorschiffbereichs

Bedingt durch immer kürzere Produktentwicklungszyklen bei gleichzeitig steigender Komplexität, gerade im schiffbaulichen Umfeld, wird das Augenmerk immer mehr auch auf Parallelisierung, dem sogenannten Concurrent Engineering, gerichtet. So liegen heute schon sehr früh digitale Modelle, auch finite Elemente Modelle, der schiffbaulichen Struktur vor. Die Optimierungsalgorithmen der Topologieoptimierung bauen primär auf genau diese Modelle auf. Eine Nutzung ab Konzeptphase zur Designfindung ist möglich. Am Beispiel des Vorschiffes wird dies im Folgenden analysiert und erörtert. Dabei kann auf die Veröffentlichungen des Autors zu diesem Komplex zurückgegriffen werden, [133], [136]. So konnte festgestellt werden, dass dem Vorschiffbereich innerhalb der Gesamtstahlkonstruktion oftmals eine untergeordnete Bedeutung zukommt. Die Bemessung der Stahlstruktur nach den anerkannten Regeln der Klassifikationsgesellschaften [28] ist richtig und aufgrund einer Vielzahl nichttrivialer Belastungen auch sinnvoll aber nicht immer zielführend. So kam es in der Vergangenheit *„im Bereich des Vorschiffes in einigen Fällen zu Schädigungen der Stahlstruktur, Abbildung 6.17. Die Ursachen sind natürlich vielfältig. Es liegt aber im Interesse des Entwerfers schon im Stadium der Designfindung bzw. –bewertung mögliche Schäden abzuwenden. Daher ist es notwendig zusätzliche Werkzeuge und Hilfsmittel in Bezug auf die Vorschiffdimensionierung in Betracht zu ziehen.“*[133]. Damit besteht die Motivation bezüglich des Vorschiffs darin, schon ab der Konzeptphase für ausreichende Steifigkeit des Bereiches Sorge zu tragen. Optimierungsziel ist eine Maximierung der Steifigkeit unter Masserestriktionen.



Abbildung 6.17: Beispiele für Strukturschäden im Vorschiff

6.2.1 Geometrie des Vorschiffs und funktionale Beschreibung

Für die Optimierung der Stahlstruktur ist es wichtig, die in diesem Bereich zu erfüllenden Funktionen genau zu kennen. Vorschiffsformen werden in Abhängigkeit ihrer Nutzung und unter Berücksichtigung anderer Schiffseigenschaften gestaltet. Für die praktische schiffbauliche Implementierung der vorgestellten Algorithmen wird eine ConRo-Fähre gewählt:

Tabelle 19: Hauptabmessungen des Schiffskörpers ConRo

Variable	Wert	Einheit	Bedeutung
L_{PP}	199,42	m	Länge zwischen den Loten
L_{OA}	210	m	Länge über alles
B	29,60	m	Breite
D	10,90	m	Seitenhöhe
T_D	8,45	m	Designtiefgang
C_B	0,661		Blockkoeffizient
DW	19460	t	Verdrängung
v_0	20	kn	Geschwindigkeit

Bemerkenswert sind die Verhältnisse der geometrischen Abmessungen, welche ein anderes als in Abbildung 6.17 dargestelltes, nämlich schlankeres Vorschiff mit relativ kleinem Wasserlinieneintrittswinkel und Spantausfallwinkel, bewirkt. Neben der äußeren Form als vorderem Abschluss der Schiffsstruktur sind im Vorschiff eines derartigen Schiffstypes noch weitere funktionale Bauteile unterzubringen. Dazu gehören die Manövriereinheit in Form von Bugstrahlrudern, Teile des Ballastsystemes (Ballasttanks im Doppelboden und Seitenwänden), Ankereinrichtungen und weitere Ausrüstungs- und Einrichtungsgegenstände. Weiterhin wichtig ist die Schutzfunktion gegenüber äußeren Einflüssen. So berücksichtigt das Beispielschiff überkommendes Wasser durch einen auf Wetterdeck angebrachten Shelter. Dem schwierigen gewählten Fahrgebiet entsprechend (Nordatlantik / Neufundland) sind außerdem konstruktive Schutzmaßnahmen für die höchstmögliche Eisklasse (A1) vorzusehen.

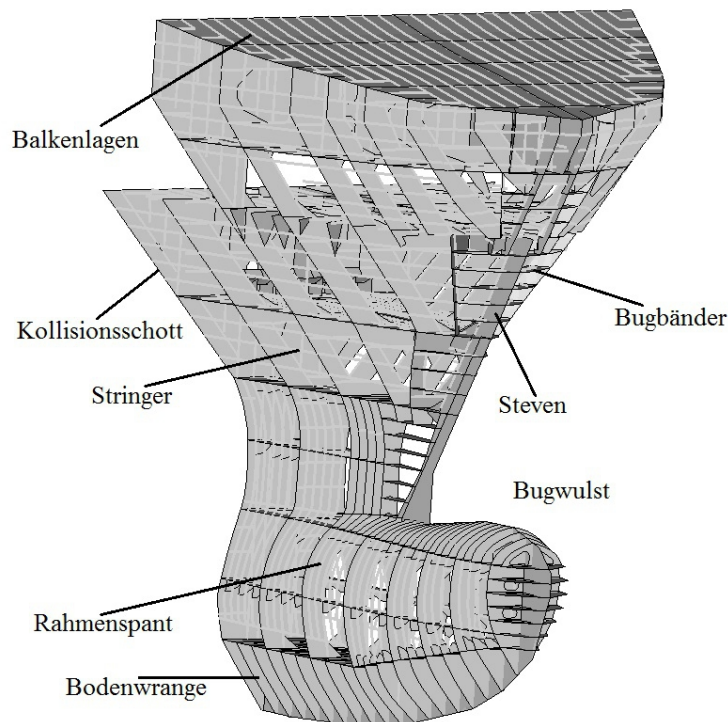


Abbildung 6.18: Strukturbauteile des Vorschiffes Typ ConRo

Für die Erfüllung aller genannten Funktionen gibt es schiffbaulich kategorisierte Strukturbauteile, Abbildung 6.18. Mechanisch angelehnt an die Struktur eines dünnstegigen Kastenträgers sind Verbände für die Festigkeit in Quer- und Längsrichtung vorgesehen. Da bei diesem Vorschiff lokale Belastungen dominieren, sind die Hauptverbände Querbauteile. Die eigentliche Bordwand, Rahmenspanten, eine verdreifachte Bodenwrangenanzahl sowie das Kollisionsschott stehen ideell für den Kastenträgersteg. Längsverbände wie Stringer bzw. Zwischendecks inklusive Decksbalken bilden die obere Gurtung des idealisierten Kastenträgers. Wohingegen die Boden-, Innenbodenbeplattung und weitere Bodenlängsverbände die untere Gurtung darstellen. Zur Abbildung der Form und Aufnahme lokaler Belastungen sind weiterhin Stevenplatte, Bugbänder und Bugwulstverbände vorgesehen.

Als Besonderheit des Beispiels zählt aber vor allem die Eisklasse. Diese macht es erforderlich den Spantabstand nicht größer als 500mm zu wählen [29]. Und letztlich ist in diesem Entwurfsstadium geplant, das Kollisionsschott vor den Bugstrahlrudern anzuordnen sowie einen Shelter zum Schutz vor grünem Wasser vorzuhalten.

6.2.2 Bauraum und Simulationsmodell Vorschiff

Zum Zeitpunkt der Konzeptphase lässt sich nur aus den funktionalen und resultierend strukturellen Anforderungen ein Modell aufbauen. Dieses enthält Informationen aus der Hydrostatik (Schiffsform, Compartmentdefinition, etc.) sowie Hydrodynamik (Maschinen-

leistungsbestimmung, Manövrierfähigkeit, etc.) und mündet in einen Globalstruktur-entwurf. Für ein etwaiges finite Elemente Modell bedeutet das oft mittlere Kantenlängen von zwei Metern und mehr. Für eine Topologieoptimierung reicht das nicht aus. Mit den Informationen zu Compartments und der Hüllgeometrie lässt sich aber unmittelbar und ohne Mehraufwand ein Bauraummodell ableiten (zehnfach reduzierte Kantenlänge). Im Folgenden stellt dies die Kategorie Hüllmodelle (Kennziffer I) dar. In einer zweiten Stufe der Untersuchung werden weitere Modelle, Kategorie Stahldetailmodelle, erzeugt. Mittels verschiedener Annahmen können deutlich detailliertere Modelle (Kennziffer II) aufgebaut werden. Diese dienen insbesondere einer verbesserten Analyse sowie dem Vergleich mit einer konventionellen Bauart. Neben dem Aspekt der Validierung lassen sich letztlich auch verschiedene Sensitivitäten bezüglich des eigentlichen Bauraummodells, der Vernetzungsparameter oder der Randbedingungen eingehender untersuchen. Um das zu erreichen, muss beim Aufbau aller Modelle auf strikte Vergleichbarkeit geachtet werden. Dies ist in der schiffbaulichen Praxis aber nicht so einfach, es kommen eine Vielzahl unterschiedlicher Programme zum Einsatz. Für die Entwicklung der Stahlschiffsstruktur zum Beispiel stehen etablierte Werkzeuge der Klassegesellschaften zur Verfügung. Für die Bearbeitung im Rahmen dieser Arbeit muss hier ein Kompromiss gefunden werden, der den Anforderungen an alle Modellkategorien genügt. So wird für das vorliegende Beispiel das Programm *Poseidon* des Germanischen Lloyd [30] genutzt. Das Wissen um die übliche Bauweise auf deutschen Werften nutzend, ist trotz der phasenbedingt geringen Informationsdichte ein klassegerechtes Struktur- sukzessive FE-Modell mit entsprechenden Randbedingungen aufbaubar. Aufgrund fehlender fortschrittlicher Flächenbeschreibungsmöglichkeiten, besitzt das erzeugte Modell in diesem Bereich aber Ungenauigkeiten. Besonders betrifft das die minderwertig gestraakte Außenhaut sowie die auffällig starke Vereinfachung der Bugstrahlruderausschnitte. Diese Nachteile werden aber in Kauf genommen, da für die wichtige Validierung in dieser Arbeit eine Modellkonsistenz nur so erreicht werden kann.

Realitätsnahe Slamminglasten wiederum kommen aus den Ergebnissen eines Forschungsvorhabens mittels CFD-Technologie [18]. Diese sind ohne weiteres nicht auf das Poseidonstrukturmodell übertragbar. Im Rahmen der Validierung, Kapitel 7.2.1, wird daher das Zusammenführen für die eigentliche Optimierungsumgebung erläutert. Aber resultierend aus einer anderen Fokussierung heraus, nämlich der späteren Projektrealisierung, ist der dann denkbare Mehraufwand eher minimal. Das die Topologieoptimierung sich dem etablierten Prozess unterordnet und einfügt, lässt sich auch an den Ergebnissen der folgend erläuterten Vorschiffbauraummodelle zeigen.

Bauraummodell

In Bezug auf die festigkeitsgerechte Auslegung der Vorschiffsstruktur ist bei großen

Schiffen der Bereich vor dem Kollisionsschott von Interesse. Dennoch wird bei der ConRo-Fähre bis zur ersten durchgehenden Wand hinter dem Kollisionsschott modelliert, Abbildung 6.19. Vom 22,50m langen Gesamtmodell entsprechen ungefähr 7,50m diesem. Der Einfluss von Fehlern infolge unzureichender Modellbildung kann so ausreichend abklingen. Die Topologieoptimierung reagiert im Allgemeinen weiterhin besonders sensibel auf Belastungen. Dominierend in der Vorschiffsstruktur sind Slamminglasten, der Deckshausbereich ist von diesen Belastungen aber nie betroffen und wird daher auch in keinem Bauraummodell berücksichtigt.

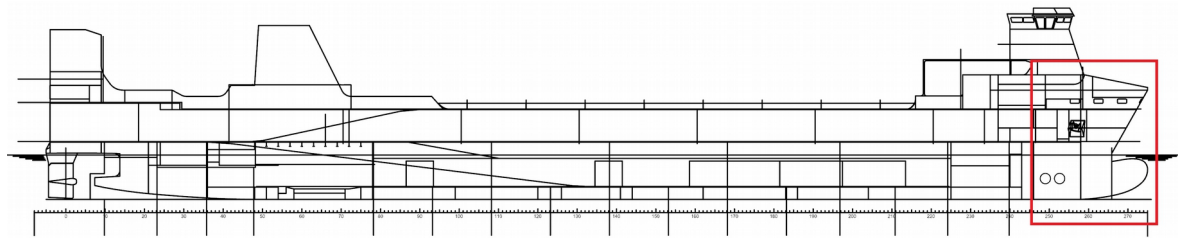


Abbildung 6.19: Seitenansicht ConRo-Fähre incl. Hervorhebung des untersuchten Bereiches

Kategorie I – Vorschiffhüllmodelle

Dem Ansatz als Hilfe für den Konzeptentwurf folgend, wird ein Modell mit einem Maximum an Freiheiten aufgebaut. Im Umkehrschluss ist auch nur noch die Stahlstruktur enthalten, die zur Definition der Bauraumgrenzen benötigt wird. Das sind dann die verschiedenen Außenhautpaneele mit Einschlüssen für Bugstrahlruder und Anker, das ebene Wetterdeck sowie die achtern angrenzenden Wandpaneele, alle unversteift. Abbildung 6.20 links zeigt diesen Bereich in Netzstruktur sowie, zur rein optischen Verdeutlichung, die nicht relevante Scheltherbaugruppe. Als zweiten Ansatz in dieser Kategorie von Modellen mit möglichst großer Optimierungsfreiheit wird ein Modell generiert, das innerhalb des eigentlich relevanten Bereiches sämtliche Freiheiten besitzt, daran angrenzend aber die vollständige tragende Stahlstruktur aufweist, Abbildung 6.20 rechts. Der Bauraum in diesem Modell wird begrenzt, achtern durch das Kollisionsschott, nach oben durch das Wetterdeck, seitlich bzw. vorne durch die Außenhaut und nach unten durch den Innenboden.

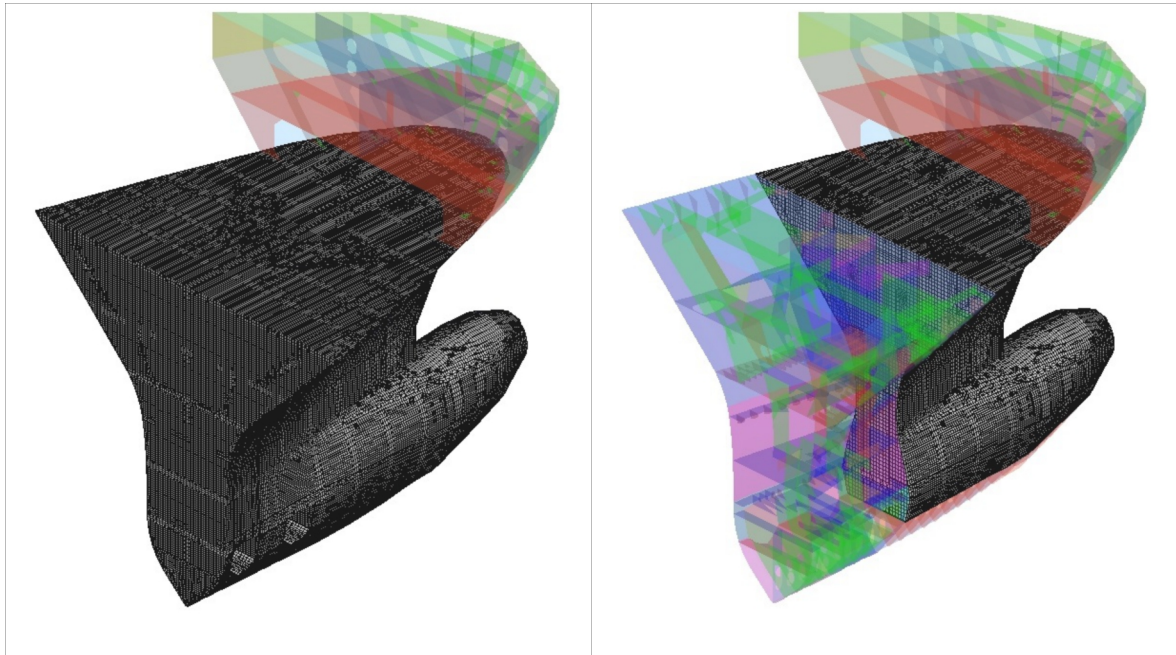


Abbildung 6.20: Gegenüberstellung der Bauraummodelle Kategorie I

Kategorie II – Vorschiffstahldetailmodelle

Auch hier werden zwei Stufen adäquat Kategorie I modelliert. Der Focus ist aber ein anderer. Zunächst wird die Stahlstruktur des gesamten Bereiches aufgebaut. Das Modell entspricht einem nahezu vollständigen Simulationsmodell für die Analyse der Stahlschiffstruktur mit sämtlichen Verbänden. In diesen Bereich wird nun zusätzlich ein Bauraum mit dreidimensionalen Elementen für die Topologieoptimierung integriert. Hintergedanke ist wieder der eigene Ansatz dieser Arbeit (gegenüber der sonst üblichen Industrieapplikationen) mit der Absicht der Überführbarkeit der Topologieoptimierung in das reale schiffbauliche Umfeld. So ist es für den Schiffbaukonstrukteur nicht möglich, uneingeschränkt dem Vorschlag einer Topologieoptimierung zu folgen. Vielmehr soll deren Anwendung dem Konstrukteur als Werkzeug dienen, sein Design gezielt zu verbessern. Bei Tragwirkung der gebauten allgemeinen Stahlstruktur werden Lage und Art verbleibender Elemente am Ende des Algorithmus Aufschluss über gezielte Verbesserungsmöglichkeiten geben.

Die Bauraumgrenzen entsprechen dabei den Stufen aus Kategorie I, vgl. Abbildung 6.20 wobei transparente Bereiche nunmehr tragende Strukturbauteile darstellen.

Vernetzungsparameter

Für die kompletten Vorschiffmodelle sind nahezu alle Elementarten notwendig. Versteifte Quer- und Längsverbände werden aus einer Kombination von Schalen (2D) und außermittig angeschlossenen Balkenelementen (1D) gebildet. Auch alle weiteren Stahlplattenbauelemente, bis hin zu Knieblechen, werden als Schalenelemente modelliert.

Diese Verteilung der Parameter findet sich in allen Modellkategorien wieder. Das gilt auch für die den Bauraum bildenden Tetraeder oder Pyraeder (3D) jeweils mit linearem Elementansatz.

Aus dem gegebenen Spantraster von 375mm bis 750mm kann man die Vorzugselementkantenlänge ableiten. Mit dem gewählten Längenwert von 150mm können künstliche Überhöhungen vermieden werden. Dies wirkt sich auch positiv auf die Optimierung aus. Die Bauräumelemente sind direkt an die Struktur gekoppelt, deren Vorzugswert bildet den Eingang für die Elemente des Bauraumes. Mit dem genannten Wert können sich starke Kraftpfadbündel (mindestens 3 Elementnachbarn) im Zuge der Topologieoptimierung bilden, ohne die Grenzen des Spanrasters zu verletzen.

Anderweitige Aspekte des Vorschiffes vor allem in Bezug auf die konstruktive und strukturmechanische Analyse werden im folgenden Kapitel 7 besprochen. An dieser Stelle lassen sich die vorhandenen Elemente qualitativ und quantitativ entsprechend ihrer Dimensionen zuordnen:

Tabelle 20: Spezifikation der Vernetzungsparameter der Bauraummodelle des Vorschiffs

Modell/ Kategorie	Elementtyp	Kanten- länge Ø [mm]	Funktionale Beschreibung	Elementanzahl
Kategorie Hüllmodelle, Bauraum groß	Schalenelement Quad und Tria	100	Außenhaut, W-Deck, Schott, Bugstrahler	81191 + 31478
	Volumenelement Tetra und Pyra	200	Bauraum	4152204 + 81191
Kategorie Hüllmodelle, Bauraum klein	Quad und Tria	100	Außenhaut, W-Deck, Schott, Bugstrahler, Schotte, ...	1169959 + 37455
	Beam	100	Spanten, Beulsteifen außerhalb Bauraum	13658
	Tetra und Pyra	200	Bauraum	3448880+ 36531
Kategorie Stahldetail- modelle, Bauraum groß	Schalenelement Quad und Tria	100	A.-haut, Decks, Schotte, Bugstrahler, Innenboden, Shelter, Längsträger, Steven, Fundamente, Rahmenspanten, ...	129729 + 40631
	Beam	100	Spanten, Beulsteifen	21763
	Tetra und Pyra	180	Bauraum	4152204 + 81191
Kategorie Stahldetailm., Bauraum klein	Quad und Tria	100	Siehe oben aber nur außerhalb Bauraum	130221 + 40856
	Beam	100	Spanten, Beulsteifen	21763
	Tetra und Pyra	180	Bauraum	3448880 + 36531

Auch die Qualität des erzeugten Netzes lässt sich prüfen. Hier zeigen sich die Ein-

schränkungen des aus dem Softwareprogramm der Klassegesellschaft generierten und importierten Modells. Vordergründig die Qualitätskriterien zu Mindestwinkeln und Verzerrung werden nicht immer vom Netz eingehalten, Tabelle 21. Natürlich betrifft das den besonders gekrümmten und engen Bereich in Stevennähe und im Bugwulst. Durch die direkte Abhängigkeit ist in geringem Maße auch die 3D-Vernetzung betroffen. Dennoch ist insgesamt von einem akzeptablen Netz zu sprechen. Das gilt umso mehr, als das 2D-Modell nur die umhüllende Begrenzung darstellt. Die Variablen der Topologieoptimierung sind ausschließlich 3D-Elemente. Deren Qualität ist sehr gut, vor allem durch die feine Vernetzung bei sehr großen räumlichen Dimensionen.

Tabelle 21: Durchschnittsergebnisse Element-Qualitätsprüfung beim Vorschiff

Qualitätskriterium	Unterer Grenzwert	Fehlerrate Elementzahl		Fehlerrate prozentual	
		2D	3D	2D	3D
Seitenverhältnis (Aspect Ratio)	5,0	952	1535	0,10	0,01
Winkel Trias	20°	3560	19897	11,00	0,01
Winkel Quads	40°	2274	2274	3,00	3,00
Jacobi-Determinante	0,6	1351	10313	1,00	0,01
Verzerrungswinkel (Skew)	0,6	7270	85070	6,00	2,00

Geometrische Randbedingungen

Die Randbedingungen des Vorschiffmodells entsprechen den Lagerbedingungen in Form von Knotenverschiebungen und -verdrehungen. Von Achtern aus, auf Spant 246 bei $x=184,5\text{ m}$, wird das Modell fest eingespannt, Abbildung 6.21. In dieser Ebene ist eine ebene Schottwand angeordnet, die Einspannung gilt für alle Knoten dieser Ebene. In der Realität lässt sich nur schwer ein fester Einspannpunkt zuordnen. Regularien beruhen oft auf der Modellierung globaler Schiffskörper oder mindestens großer Subsysteme [3]. Bezüglich eines Globalmodells sind an den Enden federnde Lagerungen vorzusehen. Für das vorliegende Vorschiff bildet aber der Bereich vor dem Kollisionsschott auf Spant 255 bei $x=191,25\text{ m}$ den eigentlichen Schwerpunkt. Die genannte Näherungsmodellierung über Federlager ist nicht sinnvoll. Vielmehr wird angenommen, dass der Spannungszustand des Vorschiffs durch die vereinfachte Lagerung an einer weiter mittschiffs gelegenen Wand nicht wesentlich gestört wird.

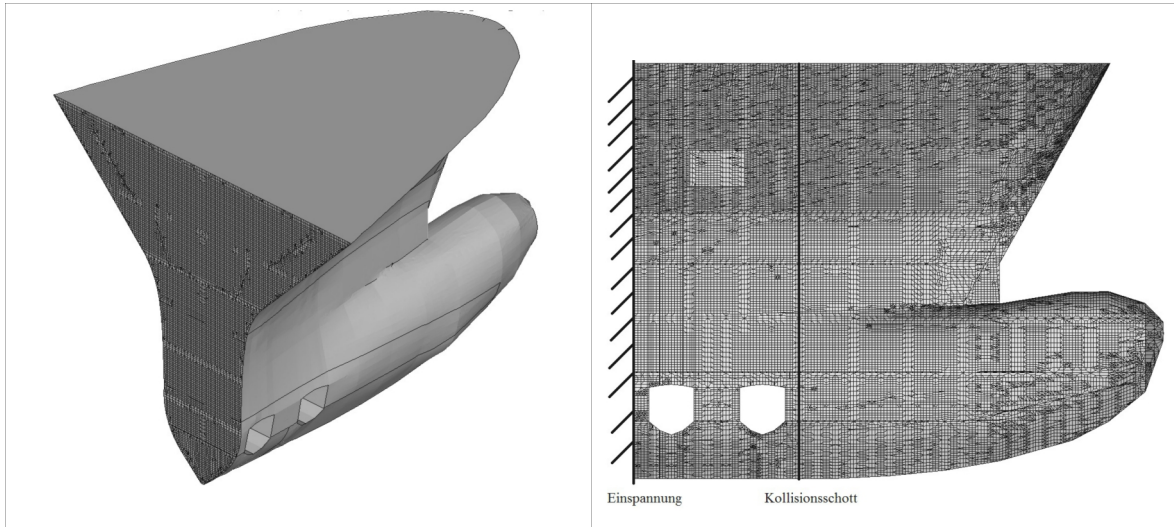


Abbildung 6.21: Skizze der geometrischen Randbedingungen des Vorschiffs

Natürliche Randbedingungen

Auf die Bauteile des Vorschiffs wirken Belastungen aus der lokalen Struktur, wie Deckslasten, Tankdruck oder ähnliches. Die hauptsächlich hydrodynamischen und hydrostatischen Belastungen finden aber an der Außenhaut durch die See (Druck und Eislasten) und zusätzlich durch Slamminglasten statt, siehe Skizze 6.22.

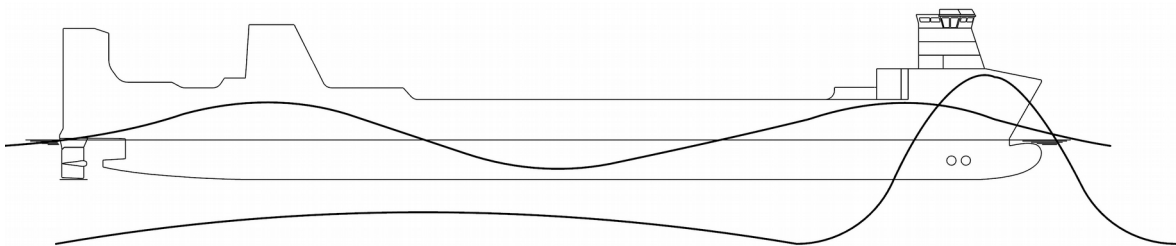


Abbildung 6.22: Vergleichsskizze der Seegangsnormalbelastung und Slamming

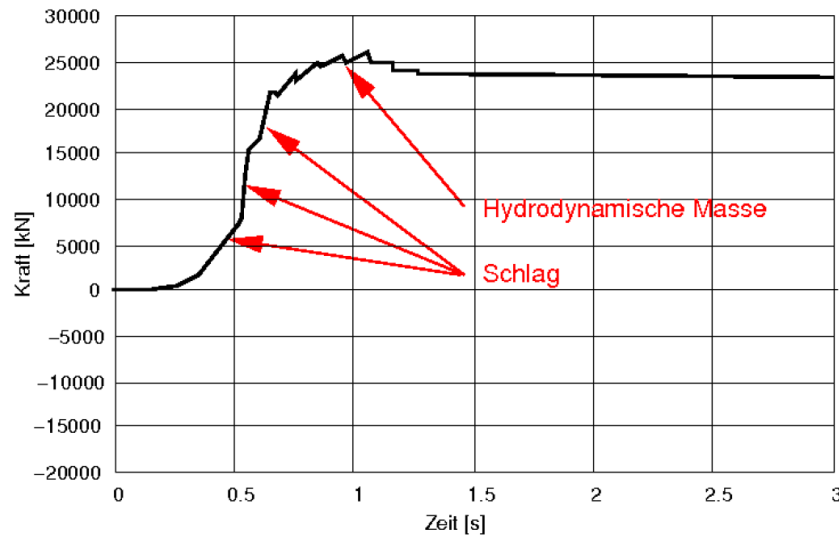


Abbildung 6.23: Belastungsplot ortsgebunden über die Eintauchzeit am Vorschiff nach [18]

Strukturlasten und die Slammingbelastung des Bodens lassen sich nach den Vorschriften von Klassifikationsgesellschaften annehmen, z.B. des Germanischen Lloyd [29]. Abhängig von der Schiffslänge, dem Entwurfsballasttiefgang sowie der Belastungsfläche zwischen den Auflagern und dem Fahrtbereich, weisen diese Maxima der Bodenslammingbelastung beispielsweise bei $0,8 \cdot L$ aus. Für das Bow Flare Slamming (Druck aus Seitenschlag) gilt das nicht. Daher lassen sich zunächst erst einmal nur Grundlastfälle definieren. Mit Hilfe der Bemessungssoftware *Poseidon* [30] des Germanischen Lloyd ist das automatisiert möglich. Tabelle 22 Zeile 1 bis 4 listet die generierten Fälle, beginnend mit dem statischen Druck bei minimalem und maximalem Tiefgang, die dazugehörigen Eisdrücke, die Tankbelastungen in der Vorpiek des Schiffes und schließlich die Bodenslamminglast, auf. Kombinationen der genannten Lastfälle sind zeitgleich nicht möglich. Der Tiefgang vollbeladener Schiffe ist besonders groß, so dass Bodenslamming selten auftritt. Bei geringer Beladung wiederum verändert sich der vordere Trimm und führt zu einem geringen Tiefgang. Die Folge ist ein deutlich häufigeres Auftreten von Slamminglaststößen in der See. Die hydrodynamischen Stöße auf die Schiffsseiten treten aber unabhängig vom Tiefgang auf. Deren resultierende Drücke auf die Schiffsaußenhaut lassen sich, wie in der funktionalen Vorschifferläuterung bereits angesprochen, oft nur durch nichtlineare Seegangsanalysen ermitteln. Im Folgenden wird auf die Ergebnisse des Forschungsprojektes „*LASSE-Lasten auf Schiffe im Seegang*“ [18] zurückgegriffen, siehe auch Abbildung 6.23. Basierend auf diesem Vorhaben, mit Modellversuchen und Entwicklung numerischer Methoden für den Seeschlag quertreibend in Wind und Seegang, stehen für das Beispiel Druckverteilungen eines Eintauchvorganges von 3 Sekunden auf der Schiffsaußenhaut im Seegang zur Verfügung, Abbildung 6.24. Die Auswertung verschiedener Eintauchszenarien zeigt, dass die größte Belastung am Eintauchende vorhanden ist. Das gilt auch für das Eintauchintervall des Beispielschiffes. Daraus werden

die Lastfälle (Drücke vom Intervallende drei Sekunden) der fortlaufenden Nummern 5 bis 9 generiert, Tabelle 22. Durch den großen Spantausfall des Beispielschiffes sind diese Drücke bei quertreibender Fahrt am deutlichsten spürbar.

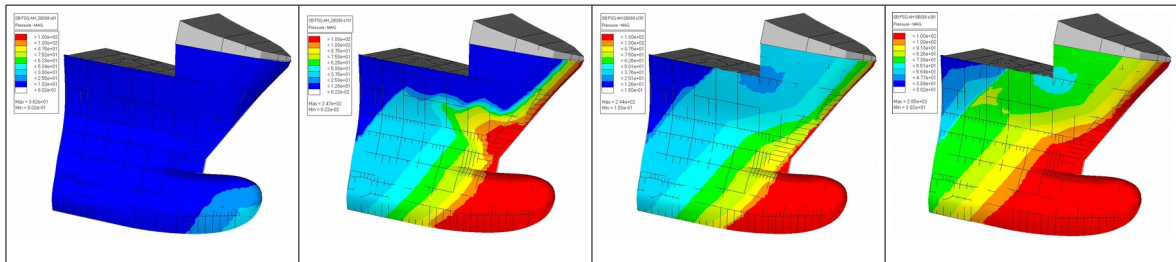


Abbildung 6.24: Qualitativer Belastungsverlauf für Eintauchvorgang nach CFD-Rechnung, von links Intervallanfang bis rechts Intervallende nach 3 Sekunden (Skalennormiert auf 100 kN/m²)

Tabelle 22: Lastfälle für die Optimierung des Vorschiffs

ID	Beschreibung / Fahrtzustand des Schiffes	Lasten	Lastbe- rechnung
1	Ballastfahrt auf <i>min. Tiefgang</i> durch <i>Eis</i> Die Ballasttanks sind in solchen Fällen idR gefüllt um einen größeren Tiefgang zu erreichen	(a) Hydrostatischer Wasserdruck auf T_min= 5.5m (b) Eisdruckgürtel (300mm) über T_min (c) Druck in Ballasttanks	GL Rules → Poseidon- Automat
2	Fahrt auf <i>max. Design-Tiefgang</i> Ballasttanks sind leer, das Schiff voll beladen Zusätzlich wird Fahrt durch <i>Eis</i> angenommen	(a) Hydrostatischer Wasserdruck auf T_max= 8.6m (b) Eisdruckgürtel (300mm) über T_max (c) Druck in Ballasttanks	„
3	Fahrt auf <i>max. Design-Tiefgang</i> Ballasttanks gefüllt, das Schiff voll beladen Zusätzlich wird Fahrt durch <i>Eis</i> angenommen	(a) Hydrostatischer Wasserdruck auf T_max= 8.6m (b) Eisdruckgürtel (300mm) über T_max (c) Druck in Ballasttanks	„
4	Fahrt durch raue See, auftreten von Bottom Slamming Ballastfahrt mit gefüllten Ballasttanks	(a) Slamming am Schiffsboden (b) Druck in Ballasttanks	„
5	3 Sekunden Eintauchvorgang in rauer See- Intervallende, fast parallel zur Welle von Backbord (PS)	Slammingintervallendwert, (a) PS zu 100%	CFD- Rechnung
6	3 Sekunden-Intervall, fast parallel zur Welle von Steuerbord (SB)	(a) SB zu 100%	„
7	3 Sekunden Tauchvorgang in rauer See- Intervallende, schräg zur See von PS	(a) PS zu 90% (b) SB zu 30%	„
8	3 Sekunden Tauchvorgang in rauer See- Intervallende, schräg zur See von SB	(a) PS zu 30% (b) SB zu 90%	„
9	3 Sekunden Eintauchvorgang in rauer See- Intervallende, frontal zur See	(a) PS zu 50% (b) SB zu 50%	„

Materialeigenschaften

Zum Einsatz für die Struktur aller Verbände im Vorschiff kommen Schiffbaustähle der Güten A24 und A36. Für die Kennwerte der linear elastischen Rechnung muss bei der Modellbildung aber keine Unterscheidung zwischen normal festem und höher festem Stahl vorgenommen werden. Die Eigenschaften welche Eingang in das Modell finden, sind an dieser Stelle aufgelistet:

Tabelle 23: Werkstoffkennwerte für den Vorschiffbereich

Kennwerte Schiffbau-Stahl A24 und A36	
Elastizitätsmodul	$E = 210\,000\text{ N/mm}^2$
Querkontraktionszahl	$\nu = 0,3$
Dichte	$\rho = 7,85 \cdot 10^{-9}\text{ kg/mm}^3$

6.2.3 Optimierungsmodell und -ergebnisse für das Vorschiff

Entsprechend der Angaben zum Bauraum und den Simulationsmodellen werden zwei Kategorien von Modellen mit den Methoden zur Topologieoptimierung untersucht. Wie auch bei der Detailkonstruktionsphase findet eine Parameterdefinition statt, siehe Tabelle 24. Aber für die Begleitung während der Konzeptphase bedeutet das, dass weniger Restriktionen zu setzen sind. Ziel ist es hierbei, dass sich Kraftpfade ausbilden, die eindeutig, gut sichtbar und nachvollziehbar sind. So ist ein wichtiger Steuerungsparameter die Einschränkung bzw. Beschränkung der Pfadquerschnitte auf ein Delta von 500mm bis 2000mm. Genauso beeinflusst weiterhin der Parameter der Volumenrestriktion dieses Pfadmanagement. Dem wird durch die Unterscheidung in zwei Kategorien Rechnung getragen. Bei der Kategorie der Hüllbauraummodelle ist es sinnvoll, die Volumenrestriktion anders zu setzen. Da nur die Designvariablen zur Festigkeit beitragen, werden mehr erlaubt (20-25%) als bei den Detailbauraummodellen (10-15%). Hier tragen sowohl die Variablen des Bauraums (alle 3D finiten Elemente) als auch das vollständig modellierte Strukturstahlmodell des Vorschiffs (1D Balken und 2D Schalen) zur Festigkeit bei. In einer weitergehenden Sensitivitätsuntersuchung zur Volumenrestriktion konnten für die Konzeptphase keine signifikanten Veränderungen festgestellt werden; eine Aufsplittung über die zwei Kategorien hinaus ist nicht sinnvoll. Daneben sind noch weitere Parameter dem Optimierungsmodell zuzufügen. Diese dienen vor allem der Robustheit für den eigentlichen Algorithmus, analog Abschnitt 6.1, und bedürfen keiner nochmaligen Erklärung.

Tabelle 24: Matrix der Modelle des Preprocessing zur Topologieoptimierung

Modell ID	Kategorie/ Bauraum	Beschreibung RB	Parameter	Constraints
1-G-1234-56789-v20	Hüllm./ Groß	Poseidon-Loads; PS_90°, SB_90°, PS_SB_0°, PS_45°, SB_45°	Mindim = 0,5 maxdim = 2,0 minGap = 2,0	$V_{top} \leq 20$ bis 25%
1-G-1234-56-v20	„	Poseidon-Loads; PS_90°, SB_90°	„	„
1-G-1234-v20	„	Poseidon-Loads	„	„
1-G-1234-56789-v20-z	Hüllm./ Groß	Poseidon-Loads; PS_90°, SB_90°, PS_SB_0°, PS_45°, SB_45°	„ z-Extrusion	„
1-K-1234-56789	Hüllm./ Klein	Poseidon-Loads; PS_90°, SB_90°, PS_SB_0°, PS_45°, SB_45°	Mindim = 0,5 maxdim = 2,0	$V_{top} \leq 20\%$
1-K-1234-56	„	Poseidon-Loads; PS_90°, SB_90°	„	„
1-K-1234	„	Poseidon-Loads	„	„
2-G-1234-56789-v10	Detailm./ Groß	Poseidon-Loads; PS_90°, SB_90°, PS_SB_0°, PS_45°, SB_45°	Mindim = 0,5 maxdim = 2,0	$V_{top} \leq 10\%$
2-G-1234	„	Poseidon-Loads; PS_90°, SB_90°	„	„
2-K-1234-56789	Detailmodell / Klein	Poseidon-Loads; PS_90°, SB_90°, PS_SB_0°, PS_45°, SB_45°	Mindim = 0,5 maxdim = 2,0	$V_{top} \leq 10\%$
2-K-1234	„	Poseidon-Loads; PS_90°, SB_90°	„	„

Mit den genannten Eingabeparametern sind die Modelle vollständig definiert; eine Konvergenz der Berechnung konnte bei allen Modellen erreicht werden.

Vorab einer Detailanalyse des Kraftpfadmanagements gibt Abbildung 6.25 einen bildhaften Vergleich zweier Topologieoptimierungsergebnisse für ein Hüllmodell des größeren Bauraumbereichs. Daraus lässt sich sofort ein entscheidendes Ergebnis ableiten. So führt eine Bemessung nach Regeln der Klassifikationsgesellschaft zu einem Lastabtrag im Inneren der Struktur in Richtung der Einspannung. Oberhalb des Niveaus für die Modellierung des Eisgürtels bei maximalem Tiefgang ist bezüglich der Außenhaut nichts zu erkennen. Das stimmt aber nicht! Die Modellierung eines mehr realitätsnahen Lastkollektivs gerade unter Einbeziehung des Seitenschlags, hingegen führt zu einer sehr ausgeprägten Verästelung. Die sichtbaren Kraftpfade zeigen, dass ein Lastabtrag auch in diesem Bereich stattfinden muss.

Auch ein zweiter wichtiger Aspekt ist obiger Abbildung entnehmbar. Im qualitativen Vergleich zwischen der Berücksichtigung der natürlichen Randbedingungen in Form von Seitenschlaglasten bei Fahrt durch raue See fast parallel zur Welle (Lastfall 5 und 6) und Seitenschlaglasten infolge verschiedenster seitlicher Einfallswinkel (Lastfall 5,6,7,8 und 9) sind keine qualitativen Unterschiede zu identifizieren. Damit ist eine ausgeprägte Sensitivität der Querwinkligkeit zur See nicht gegeben. Das ist für die schiffbauliche Implementierung der Topologieoptimierung in der Konzeptionsphase ein wichtiges Ergebnis, da der Aufwand der Generierung knotenäquivalenter Außenhautbelastungen aus CFD-Rechnungen doch nicht unerheblich ist. Für die Detailanalyse wird dieses Ergebnis im Folgenden berücksichtigt, da nur noch die Ergebnisse mit vollständigem Lastkollektiv besprochen werden.

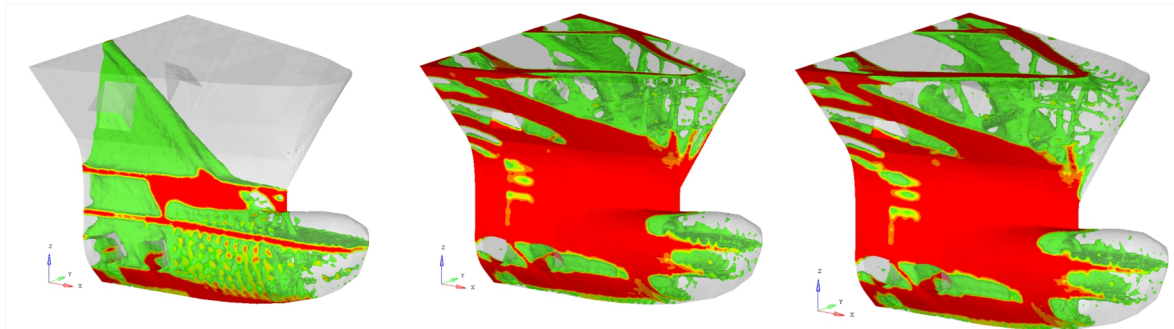


Abbildung 6.25: Optimierungsergebnisvergleich, links Hüllmodell für die Poseidonlasten, Mitte zusätzlich inkl. Seitenschlaglasten von seitlicher See und rechts inkl. aller denkbarer Seitenschlageinfallswinkel

Ergebnisse Kategorie I - Hüllkonzeptmodelle

Die erste Kategorie ist gekennzeichnet dadurch, dass bei allen Modellen innerhalb des Bauraums nur dreidimensionale Optimierungsvariablen vorhanden sind, Abbildung 6.20. Damit lässt es sich zeitlich in die früheste Phase einordnen, es gelten noch keine Restriktionen für den Algorithmus in Bezug auf Stahl. Das Wissen um diese Freiheiten ist aber wichtig für die Interpretation der Ergebnisse.

In Tabelle 25 wird für die Analyse sowohl zwischen kleinem Bauraum (Index K) mit Begrenzung Achtern durch das Kollisionsschott und großem Bauraum (Index G) über das gesamte Modell einerseits unterschieden. Andererseits wird bei beiden Kategorien der Fall aus vollständigem Lastkollektiv (Index 1234-56789) dem, der nach Klassevorschriften (Index 1234) zu modellierenden Belastungen, gegenübergestellt. Mit Blick auf den Verlauf der Iterationen zeigen sich klare Differenzen, Tabelle 25 Spalte zwei. Bedingt durch die deutlich geringere Anzahl der Variablen bei gleichem Niveau der Ungleichungsnebenbedingung (Volumenrestriktion 20%) kommt es schneller zu Konvergenz, im günstigsten Fall bereits nach 9 Iterationen. Genauso begünstigen aber auch die natürlichen

Randbedingungen den Verlauf; das vollständige Lastkollektiv kann dementsprechend nicht so schnell konvergieren. In Bezug auf die Belastungen zeigt sich weiterhin, dass wie zu erwarten ein kleines Lastkollektiv mit moderaten Druckbelastungen an der Außenhaut über eine gleichwertige Wichtung aller Lastfälle auch zu einer deutlich geringeren globalen Nachgiebigkeit respektive großer Struktursteifigkeit führt.

Tabelle 25: Vergleich des Iterationsverlaufs für die Vorschiffhüllmodelle I

Modell ID	Designvariablen	Anzahl Iterationen	Erzielte gewichtete globale Nachgiebigkeit (ZF) [J]	Veränderung der ZF [%]
1-G-1234-56789	4233395	52	112,26	-64
1-G-1234-v20	„	43	6,1	-80
1-K-1234-56789	3485411	19	1004,9	-19
1-K-1234-v20	„	9	378,7	-3

Vor der wichtigen grafischen Auswertung wird noch einmal auf den Verlauf der Topologieoptimierung am Beispiel des umfassend belasteten Hüllmodell (1-G-1234-56789) geschaut, Abbildung 6.26. Man erkennt den erwarteten Verlauf für die Zielfunktion (Minimierung der gewichteten globalen Nachgiebigkeit) mit den drei Phasen für die diskrete Erhöhung des Straffaktors von $p=2$ in zu einem Wert von $p=4$, Grenzwert für 3D-Designvariablen. So werden sukzessiv „schärfere“ Designvorschläge erreicht, vergleiche dazu auch Abschnitt 4.4.3.

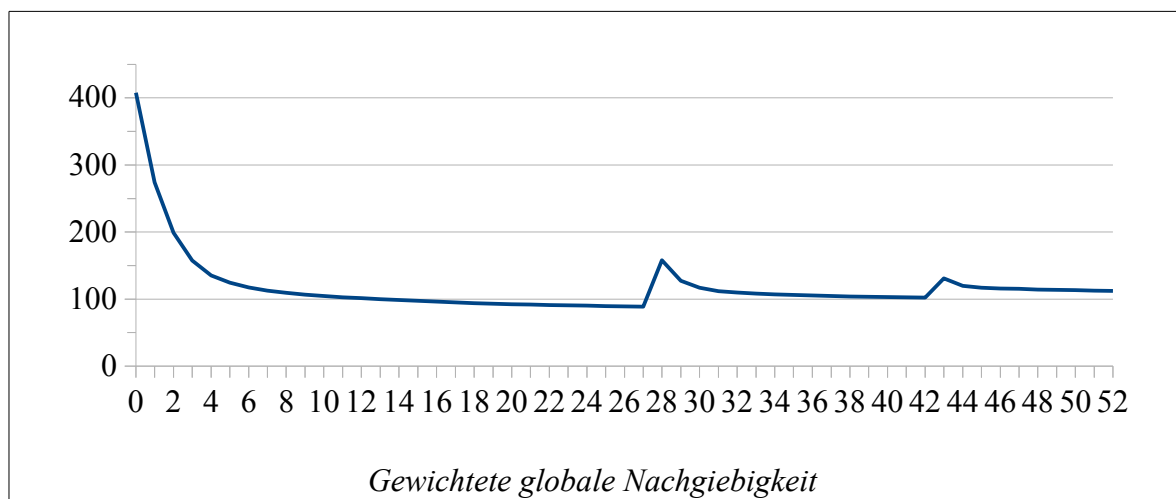


Abbildung 6.26: Grafischer Iterationsverlauf für die Zielfunktion von Modell 1-G-1234-56789

Das Vorschiffhüllkonzeptmodell, Index 1-G-1234-56789, bildet auch die Basis der grafischen Auswertungen. Der vorhandene größte Bauraum (sowohl Geometrie als auch Designvariablen) korreliert bei diesem Modell mit allen denkbaren Zusatzlasten aus

Seeschlag. Die Erkenntnisse aus der Dichteverteilung werden anschließend mit den weiteren Modellen dieser Kategorie geprüft. In Abbildung 6.27 oben ist die Dichteverteilung in zwei verschiedenen Ansichten dargestellt. Dabei wird die Elementdichte farblich markiert, grün entspricht einem Wert von 0,5 bis hin zur vollen Dichte von 1 in rot. Designvariablen bzw. 3D Elemente mit einer Dichte kleiner 0,5 sind ausgeblendet. So entsteht das für die Konzeptfindung wichtige Kraftpfaddesign, da sich durch die Normierung des E-Modul die Struktursteifigkeit nur direkt in den „gefüllten“ Elementen wiederfindet. Was man letztlich sieht ist also, unter Vorgabe der Menge (Parameter „dconstraint“ hier gleich 20%), eine bestmögliche (mit minimaler Nachgiebigkeit bzw. maximaler Steifigkeit) Materialverteilung, Abbildung 6.27.

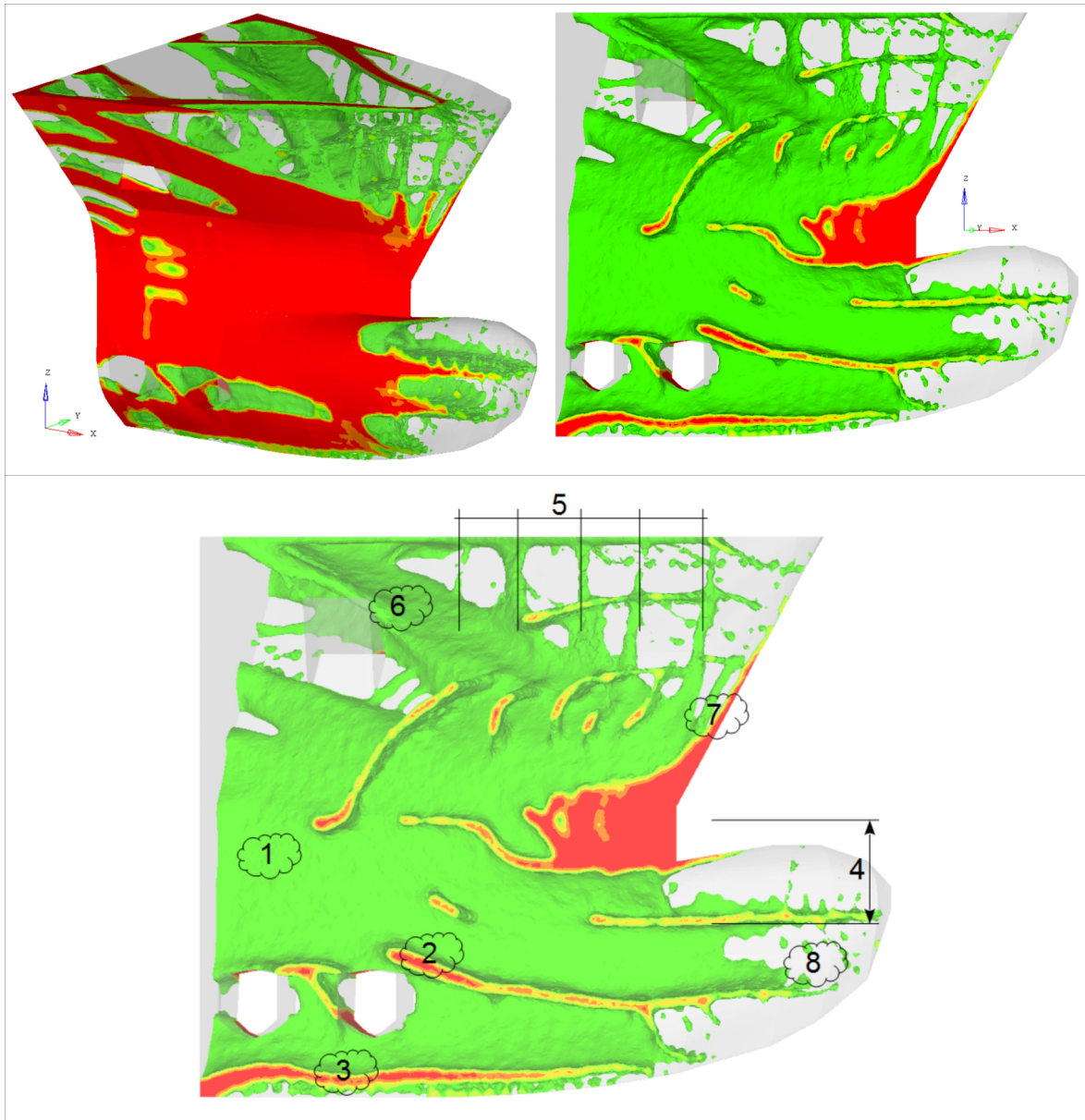


Abbildung 6.27: Iso-Voll und -Schnittansicht der Dichteverteilung sowie Hervorhebung der Ergebnispunkte für Modell 1-G-1234-56789

Im unteren Teil der Abbildung sind die markanten Merkmale des Pfaddesigns hervorgehoben. Demnach lassen sich mindestens acht interessante und damit zu diskutierende Dinge feststellen:

1. Unter Punkt 1 ist ein großer Bereich markiert, der sich so, sogar noch besser in der isometrischen Ansicht darüber, sehr deutlich erkennen lässt. Ein breiter flächiger Pfad überzieht die Außenhaut, gerichtet ungefähr entlang der Wellennormalen. Die Belastung ist in diesem Bereich aus Wellenschlag sehr intensiv, sie wird direkt bzw. sehr nahe der Außenhaut abgetragen.
2. Die Stelle 2 markiert einen sehr starken Kraftast an der Nordostseite des vorderen Bugstrahlruders, der dann nahezu waagerecht auf den Bugwulst zuläuft. Es ist davon auszugehen, dass dies eine Reaktion des Tragwerks auf Spitzendruckbelastungen am vorderen Schiffsende sowie der Superposition diesbezüglich wirkender Lastfälle ist, insbesondere bei Lastfall 1 Bottom Slamming und Lastfall 5 bzw. 6 Seitenschlag aus Eintauchen.
3. Klar zeichnet sich über die Schiffsbreite nahe dem Schiffsboden und parallel dazu eine deutliche Verästelung ab. Dies ist dem hydrostatischen Wasserdruck in jedem Lastfall sowie den großen Drücken aus dem Bottom Slamming geschuldet.
4. Markiert durch den Punkt 4 in der Ansicht zeichnen sich zwei weitere horizontale Pfade über die gesamte Schiffsbreite ab. So wurden bei den natürlichen Randbedingungen der Modelle zwei extremale Ladezustände und der dabei vorhandene Eisdruck beispielhaft berücksichtigt. Im Ergebnis der Topologieoptimierung kehren diese beiden Eisgürtelniveaus mit besonderem Schwerpunkt auf den Stevenwurzelbereich wieder. Aber da es sich um die Grenzen des im Betrieb vorhandenen möglichen Eisgürtels handelt, sollte der gesamte eingeschlossene Bereich adäquat behandelt werden.
5. Insgesamt werden in der Abbildung die Materialanhäufungen nach oben hin weniger. Aber es lassen sich, wie in der Markierung fünf gekennzeichnet, vertikale Äste herausarbeiten. Eine optische Übereinstimmung mit den üblichen Rahmenspannten des Vorschiffs ist erkennbar. Das ist umso bemerkenswerter, da dieses Modell größte Freiheiten besitzt, Rahmenspanntenbauweise o.ä. wurde nicht vorgegeben. Die Abstände zwischen den Kraftästen ist ungefähr gleichbleibend und beträgt im Mittel $2,40\text{ m}$.
6. Gekennzeichnet mit der Markierung Nummer 6 befindet sich ein diagonaler kräftiger Pfad großer Elementdichten von der Stevenwurzel kommend entlang der Außenhaut hin zur Schottwand mit den Lagerbedingungen. Dieser stellt das Pendant zu den Markierungen zwei und drei für das Oberwasserschiff dar.

7. Eine weitere Anhäufung ist im Bugbereich zu erkennen, vergleiche Markierung 7. Dies ist eine Bekräftigung der üblichen Bauweise, da in der späteren Stahlkonstruktion Bugbänder angeordnet werden. Wie auch in Punkt fünf dargestellt, ist die visuelle Ergebnisauswertung der Topologieoptimierung in der Lage, Standards der Schiffskonstruktion zu bestätigen.
8. Ein vorerst letztes zu diskutierendes Ergebnis stellt Markierung 8 dar. So kommt es nicht zu einer Elementanhäufung im Bugwulst. Über die in Punkt zwei bzw. vier zu berücksichtigenden Kraftpfade sind für diesen Bereich keine Vorkehrungen zu treffen. Wenn dennoch in weiteren Konstruktionsphasen Augenmerk auf die stahlbauliche Bemessung des Bugwulstes gelegt wird, so geschieht dies aufgrund andersartiger stark lokaler Einwirkungen heraus, wie zum Beispiel der Kollisionsbelastung. Diese sind bewusst im Modell nicht berücksichtigt.

Die weiteren gerechneten Varianten zur Kategorie I bestätigen in weiten Teilen die soeben herausgearbeiteten Ergebnisse. So zeigt sich bei den Modellen mit den nach Klassevorschrift zu berücksichtigenden Belastungen, dass sich die Markierungen 2, 3, 4 und 8 genauso darstellen. Die Punkte 1, 5, 6 und 7 hingegen widersprechen dem Modell mit vollständigem Lastkollektiv, vergleiche Abbildung 6.25. Die Ursache liegt ganz klar in der Verschiedenartigkeit der Kollektive. Die Topologieoptimierung ist belastungssensitiv und so müssen sich Unterschiede zeigen. Bei Modellen dieser Kategorie mit verändertem Bauraum (Index K) gibt es keine neuen Erkenntnisse. Jegliche optischen Abweichungen in der Dichteverteilung sind auf die Modellierung, sprich Bauraumverringerung, zurückzuführen, Abbildung 6.28. So bilden letztlich die acht Markierungen aus Abbildung 6.27 das Regime für das Kraftpfadmanagement auf Hüllkonzeptebene. Mit Ergänzung der Untersuchungsergebnisse aus den Berechnungen von Kategorie II werden Designvorschläge entwickelt.

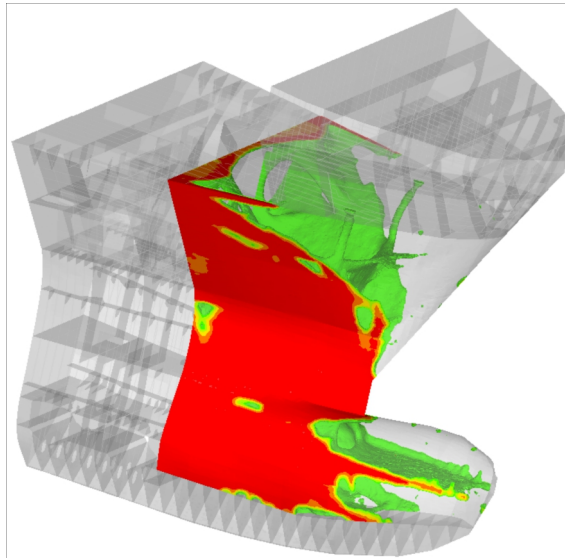


Abbildung 6.28: Iso-Vollansicht der Dichteverteilung für Modell 1-K-1234-56789

Ergebnisse Kategorie II - Vorschiffsstahldetailmodelle

Im Unterschied zum Vorhergehenden werden nun Modelle mit vollständiger Stahlstruktur im Inneren vergleichend herangezogen. Damit passen solche Modelle eigentlich nicht in die Konzeption, die Informationen liegen zeitlich einfach noch nicht vor. Da aber die Validierung mit der Strukturanalyse des Vorschiffs Bestandteil dieser Arbeit ist, sind Modelle mit diesem Detaillierungsgrad möglich. Sie dienen hier dem vertieften Verständnis in Bezug auf schiffbauliche Übertragbarkeit der Topologieoptimierung.

Wie erwartet, zeichnen sich auch in dieser Kategorie nahezu identische Iterationsverläufe ab, Tabelle 26. Einzig die erzielte Nachgiebigkeit liegt trotz zusätzlicher Stahlmodellierung durchgängig auf einem höheren Niveau als bei den Hüllmodellen. Ursache ist die hier verwendete strengere Volumenrestriktion. Dies zeigt, dass die Volumenelemente also die Designelemente den deutlich höheren Beitrag zur Struktursteifigkeit leisten.

Tabelle 26: Vergleich des Iterationsverlaufs für die Vorschiffhüllmodelle II

Modell ID	Designvariablen	Anzahl Iterationen	Erzielte gewichtete globale Nachgiebigkeit (ZF) [J]	Veränderung der ZF [%]
2-G-1234-56789	4233395	40	252,6	-65
2-G-1234-v10	„	42	18,8	-75
2-K-1234-56789	3485411	19	1111,3	-19
2-K-1234-v10	„	11	383,2	-4

Das Kraftpfaddesign als Grundlage für die Konzeptbeschleunigung ist wiederum aus der optischen Dichteverteilung in den Ansichten des Postprozessings hergeleitet, Abb. 6.29.

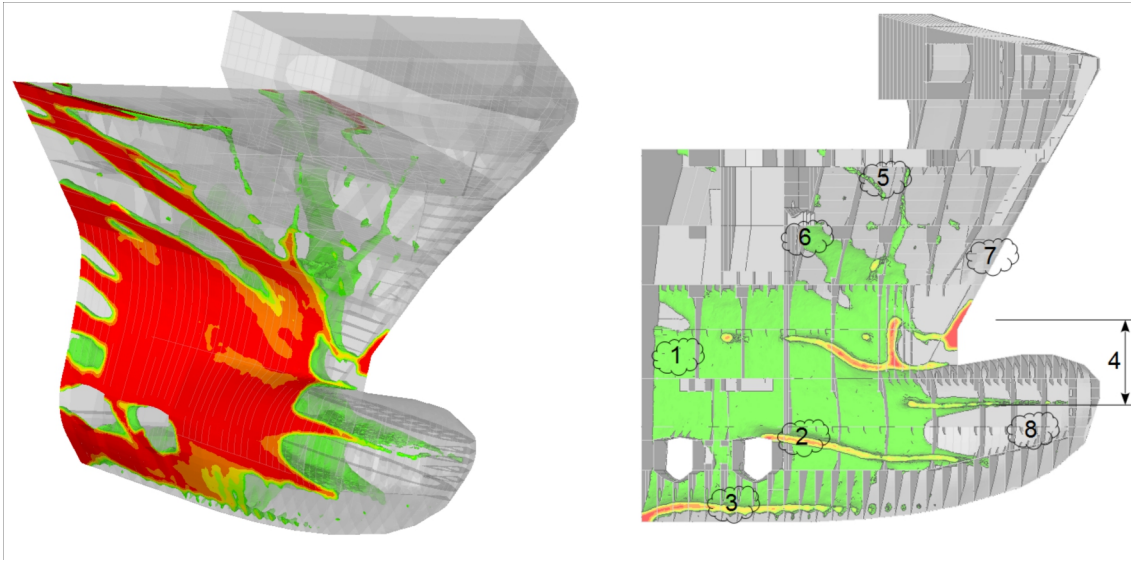


Abbildung 6.29: Iso-Voll- und Schnittansicht der Dichteverteilung für Modell 2-G-1234-56789

Aufbauend auf die Referenz der bisher festgestellten markanten acht Merkmale wird das Optimierungsergebnis diskutiert.

1. Die Ansammlung entlang der Außenhaut bleibt flächig, ist aber deutlich geringer. Der überlagerte Festigkeitsbeitrag der Stahldetails liefert also den gewünschten Beitrag. Die immer noch vorhandene erhöhte Elementdichte zeigt aber, dass dieser Bereich wichtig ist für die Struktursteifigkeit.
2. Der starke Kraftast vom Bugstrahlruder, zulaufend zum Bugwulst, bleibt erhalten. Offensichtlich berücksichtigt die Stahlkonstruktion dieses Phänomen nahezu gar nicht. Hier muss ein Designvorschlag reagieren.
3. Auch die waagerechte Verästlung nahe des Schiffbodens bleibt erhalten. Aber hier ist klar eine Verringerung zu erkennen, der vorhandene Stahl übernimmt große Teile der Beanspruchung. Ein weiteres Versteifen scheint an dieser Stelle nur optional.
4. Belastungen im Bereich der Stevenwurzel werden in dieser Kategorie ausreichend aufgenommen. Der scheinbare Bereich direkt an der Stevenspitze muss nicht berücksichtigt werden. Aufgrund des extrem spitzen Zulaufs ist die modellhafte Abbildung fehlerbehaftet und führt zu künstlicher Überbewertung. Aber der untere Grenzbereich des Eisgürtels bleibt als horizontale Kraftfläche erhalten. Das Zentrum bildet der Beginn der Bugwulstkonstruktion. Auch eine Art senkrechte Säule einige Meter weiter hinten ist weiterhin auszumachen.
5. Kraftansammlungen im Spantraster nach Markierung fünf sind nicht mehr relevant. Die Rahmenspannbauweise mit den vorhandenen Plattenstärken bedürfen keiner

Veränderung.

6. Diagonal zum Oberdeck und zur Schottwand zulaufend, hat sich auch diese Elementanhäufung mehr als halbiert. Der verbleibende Kraftpfad kann aber bei einem Designvorschlag Berücksichtigung finden.
7. Die Dichteverteilung zeigt eindeutig keine Anhäufung im Bereich der Bugbänder. Diese versteifen in exakter Weise.
8. Für die Struktursteifigkeit ist der Bugwulst auch in dieser Kategorie nur von untergeordneter Bedeutung.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass viele Phänome in den üblichen Konstruktionen meist schon berücksichtigt sind. Das ist erfreulich, spiegelt es doch das vorhandene Knowhow der Konstruktionsabteilungen wider. Der Handlungsbedarf aufgrund der Topologieoptimierungsergebnisse bleibt damit sehr moderat und auf Details beschränkt. Das bedeutet aber auch, dass für das Spannungsniveau als anschließende Validierungsgrundlage sehr wenig Veränderungen zu erwarten sind.

6.2.4 Designvorschlag und Ergebnisüberführung

Die Optimierungsergebnisse haben bestätigt, dass das Konzept für die Stahlkonstruktion in Spantbauweise mit kategorisierten Quer- und Längsversteifungen funktioniert. Die Idealisierung zu einem Modell eines dünnstegigen Kastenträgers (mit der Einspannung am Ende) ist auf diese Bauweise größtenteils abgestimmt. Dennoch zeigt sich auch, dass, wenn auch gering, Optimierungspotential besteht. So sind die Ergebnisse nutzbar für eine weitere Versteifung der Struktur, um Schäden entsprechend Abbildung 6.17 konsequent vorzubeugen. Die Ergebnisse zeigen aber auch, dass im Schiffbau eine Umsetzung aus dem dreidimensionalen Kraftpfadlayout nicht direkt erfolgen kann. Es geht darum, die Ergebnisse zu nutzen, um leichter und vor allem zielgerichteter konzeptionelle Vorschläge abzuleiten, die zudem überführbar in die Praxis sind. So wird folgend anhand der acht herausgestellten Merkmale ein Vorschlag konzipiert und umgesetzt.

Die konventionelle generierte Stahlstruktur des Vorschiffbereichs baut auf den heute üblichen Bauweisen spezialisierter deutscher Werften auf. Basierend auf dieser Konstruktionsgrundlage ist es möglich, mit nur minimalen Änderungen bzw. Anpassungen für die Merkmale des Kraftpfadmanagements Vorschläge zu erarbeiten. In der Diskussion des Optimierungsergebnisses des vorigen Kapitels sind bereits die wichtigen Punkte für die Neukonstruktion benannt und begründet, vgl. Abbildung 6.30. Daher werden nur für diese Positionen 2, 4 und 6 Anpassungen vorgenommen.

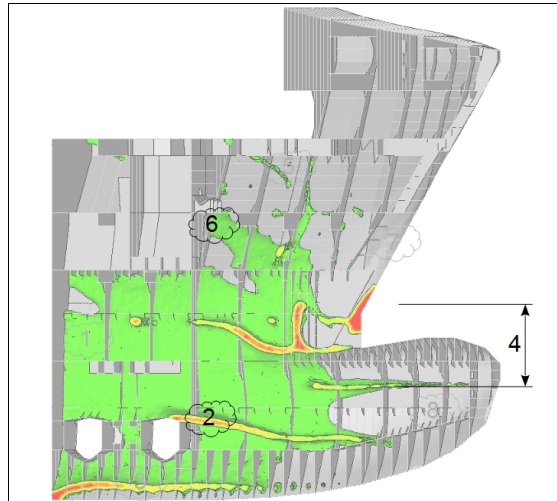


Abbildung 6.30: Darstellung der wichtigen Ergebnispunkte für die Konstruktionsanpassung Modell II

Ursache für die astförmige Elementdichte von Position 2 ist die Beanspruchung aus Bodenschlag bzw. der Eintauchbeginn bei Seitenschlag. Um dieser Belastung entgegenzuwirken bildet sich tangential zum Lastenfallswinkel dieser Druckstab. Lässt der Stand der Konzeptphase noch die Möglichkeit zu, so ließe sich durch Verschieben der Lage der Bugstrahlruder bzw. des Kollisionsschottes in positive x-Richtung die Belastung aufnehmen. Denkbar ist weiterhin das naheliegende Stringerdeck etwas weiter herunterzuziehen. Aber bei Fixierung der Positionen sind letztlich andere Maßnahmen vorzusehen. Aus dem Vergleich der Ergebnisse von Kategorie I und II ist schon eine, wenn auch geringe, Reduktion der Elementdichte zu entnehmen. Das Schott als Quer- und das Stringerdeck über dem Innenboden als Längsverband tragen Last ab, aber nicht ausreichend. Daran anknüpfend werden nun die Stringer zur Wand hin verstärkt. Zur Orientierung und Verdeutlichung zeigt Abbildung 6.31 die konstruktive Maßnahme im Strukturmodell.

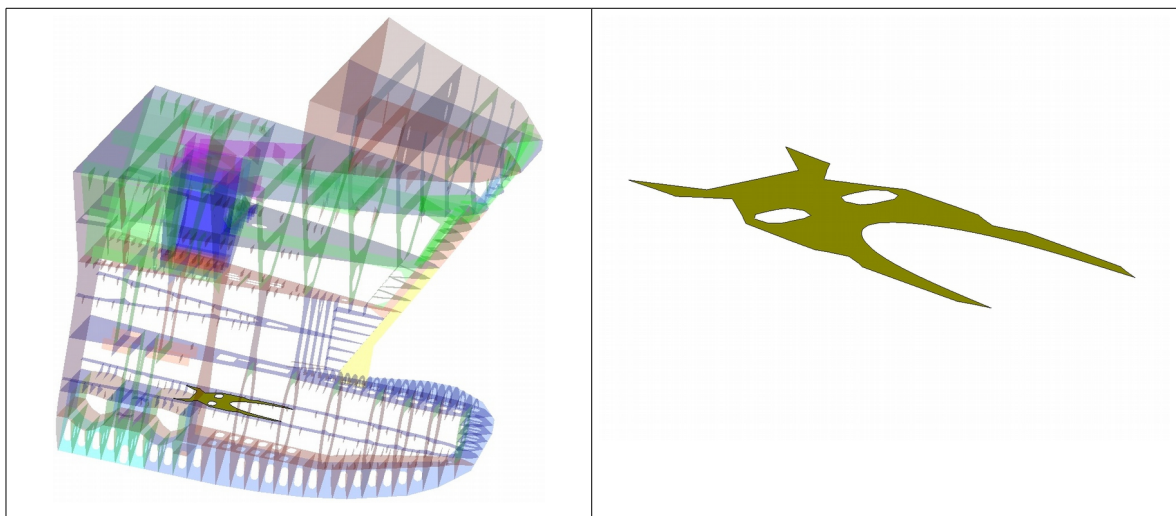


Abbildung 6.31: Konstruktionsvorschlag Optimierungsmodell für Position 2

Die Markierungen zu den Elementdichteanhäufungen des Punktes 4 resultieren vorwiegend aus Belastungen der modellierten Eisgürtellasten. Dieses Phänomen bleibt in geringerem Maße auch bei den Stahldetailmodellrechnungen erhalten. In Bezug auf die Randbedingungen für das Modell sind nur obere und untere mögliche Grenzen des Eisgürtels modelliert. Also betreffen die Elementdichteanhäufungen in der Realität den kompletten eingeschlossenen Bereich. Als Designvorschlag wird daher nur das Modell angepasst, d.h. die beteiligten Rahmenspanten und Stringer verstärkt durch entsprechende Dickenanpassung. Aufschläge sind im Bereich des Beginns der oberen Bugwulstkonstruktion vorzunehmen. Auch für die zu erkennende senkrechte Elementanhäufung in Form einer Säule werden bei den örtlich entsprechenden Rahmenblechen Dickenaufschläge vorgenommen. Grundlage aller Aufschläge ist eine Erhöhung von ungefähr 10 Prozent, angepasst an übliche Liefermaße stahlbaulicher Platten.

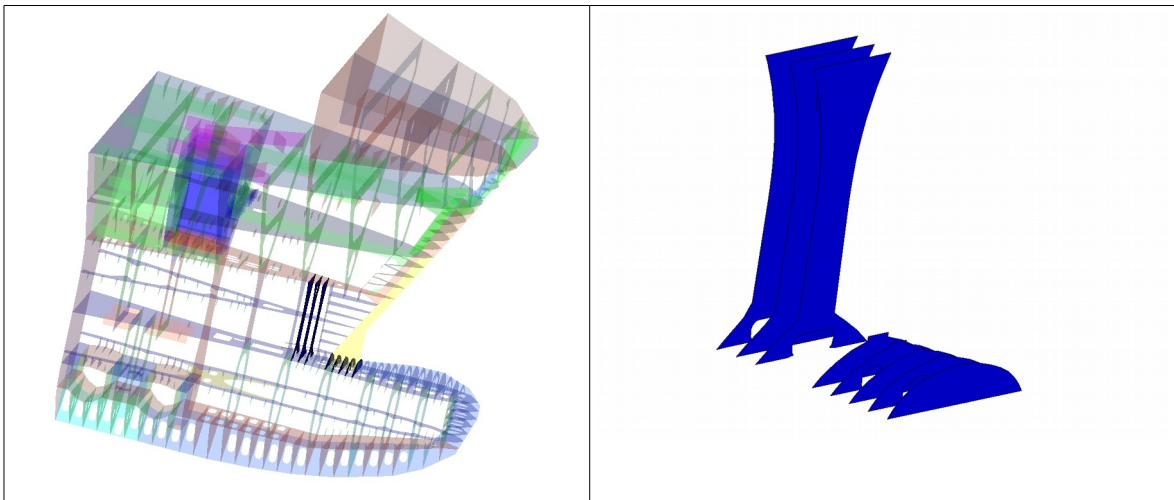


Abbildung 6.32: Konstruktionsvorschlag Optimierungsmodell für Position 4

Der breitere Kraftpfad im Oberwasserschiff, diagonal nahe der Außenwand zur gelagerten Wand zulaufend, entspricht dem Punkt 6 der Ergebnismarkierungen. Global gesehen will das Vorschiff aufgrund der von vorne kommenden (lokalen) Belastung eine Aufwärtsbewegung vollziehen. Damit sollten aus der Analogie des dünnstegigen Kastenträgers die Elementdichtehäufungen zum Flansch und geringfügig zur oberen Gurtung gezählt werden. Interessanterweise ist dieser Kraftpfad auch bei den Modellen mit den Lastfällen 1 bis 4 deutlich zu erkennen, läuft dort aber vom Boden aus immer mittig auf die Wand zu, vgl. Abbildung 6.25. Mit dem um Seitenschlag erweiterten Lastspektrum sind für dieses Phänomen eindeutig andere Bereiche zu betrachten. Für das moderate Update dieser Kategorie soll das vorhandene Raster mit Quer- und Längsverbänden erhalten bleiben. So werden die den diagonalen Pfad kreuzenden Kniebleche verstärkt durch eine Erhöhung der Dicke um circa 10 Prozent. Unter Deck 13.1 waren ursprünglich

keine Kniebleche vorgesehen. Angepasst an das bestehende System werden diese modelliert und in Abbildung 6.33 im rechten Bildteil rot gekennzeichnet.

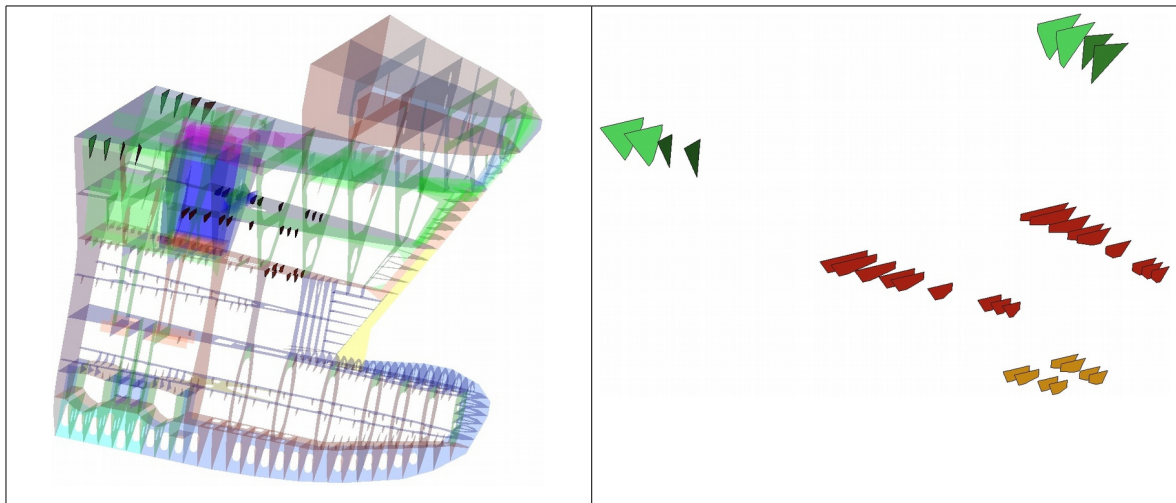


Abbildung 6.33: Konstruktionsvorschlag Optimierungsmodell für Position 6

Mit den Designvorschlägen für das Optimierungsmodell ist der Mehraufwand aus Fertigungs- sukzessive Kostensicht als gering einzuschätzen. Ein Blick auf die Stahlmassen beweist, dass der Anstieg nur moderat ausfällt. Der folgenden Tabelle ist zu entnehmen, dass die Zuwachsrate nur im Bereich von 1,36 Tonnen bzw. 0,36 Prozent liegt.

Tabelle 27: Vergleich der Stahlmassen für den Optimierungsvorschlag

Stahlmasse Leerschiff [t]	Stahlmasse VS-Modell konventionell [t]	Stahlmasse Optimierungsmodell I [t]	Veränderung [%]
11600	386,39	387,75	0,36

Wichtig für die Bewertung des Konstruktionsvorschlages ist auch die Compliance. Diese Systemnachgiebigkeit zu minimieren, entspricht der hinterlegten Zielfunktion der Topologieoptimierung. Obwohl die Ergebnisse des Kraftpfadlayouts nur indirekt umgesetzt wurden, zeigt der Vergleich der Nachgiebigkeiten für das globale Modell des Vorschiffs den vorhandenen Mehrwert. Mit lediglich 0,36 Prozent mehr Stahlmasse, ist gerade für die sensiblen Lastfälle des Seitenschlags, ein globaler Steifigkeitszuwachs bzw. eine Nachgiebigkeitsverringerung von über 1,5 Prozent erzielt worden.

Tabelle 28: Vergleich der Nachgiebigkeit für den Optimierungsvorschlag

Lastfall	Nachgiebigkeit VS- Modell konventionell	Nachgiebigkeit Optimierungsmodell I	Veränderung [%]
1	44,99	44,4	-1,32
2	31,41	31,4	-0,05
3	27,31	27,06	-0,94
4	367,81	364,39	-0,93
5	421,82	415,53	-1,49
6	421,57	415,37	-1,47
7	193,36	190,22	-1,62
8	193,18	190,1	-1,6
9	38,39	37,59	-2,08

7 Aspekte der Validierung

Mit dem Erzielen neuer Designvorschläge kann in die gewohnte Designspirale beim Planungsprozess einer schiffbaulichen Konstruktion zurückgekehrt werden. Hier folgt dann die Strukturanalyse, vgl. Abbildung 1.4. Um die im vorigen Kapitel erarbeiteten Designvorschläge aus Topologieoptimierung zu validieren, werden sie im Folgenden strukturell untersucht. Dabei beruhen die Festigkeitsuntersuchungen auf der konsequenten Nutzung der First Principles. Unter diesen direkten Berechnungsmethoden ist für den Nachweis der Strukturfestigkeit die Anwendung der Methode der finiten Elemente zu verstehen. Aber Hintergrund und Umfang reichen nicht für eine komplette Abbildung des Planungsprozesses für die Beispiele und sind auch im Rahmen der Arbeit nicht sinnvoll. Vielmehr soll das neu erzielte strukturelle Niveau im Vergleich zur Ausgangskonfiguration erarbeitet und verglichen werden. Letztlich sind auch die Stadien zu beachten in denen die Topologieoptimierung angewandt wird zu beachten. So kann die Bodenwrange im Detail Designstadium feiner aufgelöst werden, das Vorschiff der Konzeptphase besitzt noch weit mehr Unbekannte, die Analyse der Festigkeit muss das berücksichtigen.

7.1 Strukturanalyse Bodenwrange

7.1.1 Modell und Ergebnisse der konventionellen Bauart

Für die Bodenwrange auf Spant 93 sind zwei Konstruktionsvorschläge gemacht worden. Vergleichend werden folgend Festigkeitsaspekte geprüft. Das zugrunde liegende konventionelle Modell entspricht nahezu vollständig dem Simulationsmodell zur Vorbereitung der Topologieoptimierung, beschrieben in Abschnitt 6.1.2. Das zeigt, dass sich die Optimierungsrechnungen hervorragend dem gewohnten Workflow der schiffbaulichen Konstruktionsabteilung zuordnen lassen, der Mehraufwand nur in den Rechnungen selbst besteht. Vernetzungsparameter nach Tabelle 11, sämtliche Randbedingungen und auch die Materialdefinitionen bleiben erhalten.

Dann ergeben sich für die Bodenwrange nach konventioneller Bauart von Mises Vergleichsspannungen im Bereich bis ungefähr 120 N/mm^2 , Abbildung 7.1.

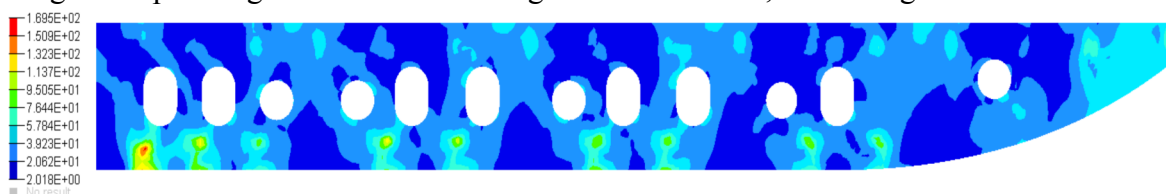


Abbildung 7.1: Vergleichsspannung BW 93 Ausgangsmodell (Netztyp nur Schalen)

Es fallen Spitzen an der Unterseite auf. Diese entsprechen so nicht der Realität und liegen

ursächlich in der Anbindung der Bodenlängsspannten an die Wrange. Hier werden große Belastungen aus den hydrostatischen Drücken der Außenhautbelastung lokal übertragen. Um diese Spitzen zu vermeiden, werden produktiv Schweißfreischnitte realisiert, Abbildung 7.2 oben. Der simulativ auftretende Effekt ist bei der Schale-Schale-Modellierung ($\leq 116 \text{ N/mm}^2$) geringer als bei einer Kombination ($\leq 192 \text{ N/mm}^2$) aus Schale (Plattenbauteile) und Balken (Spannten und Träger), Abbildung 7.2 unten.

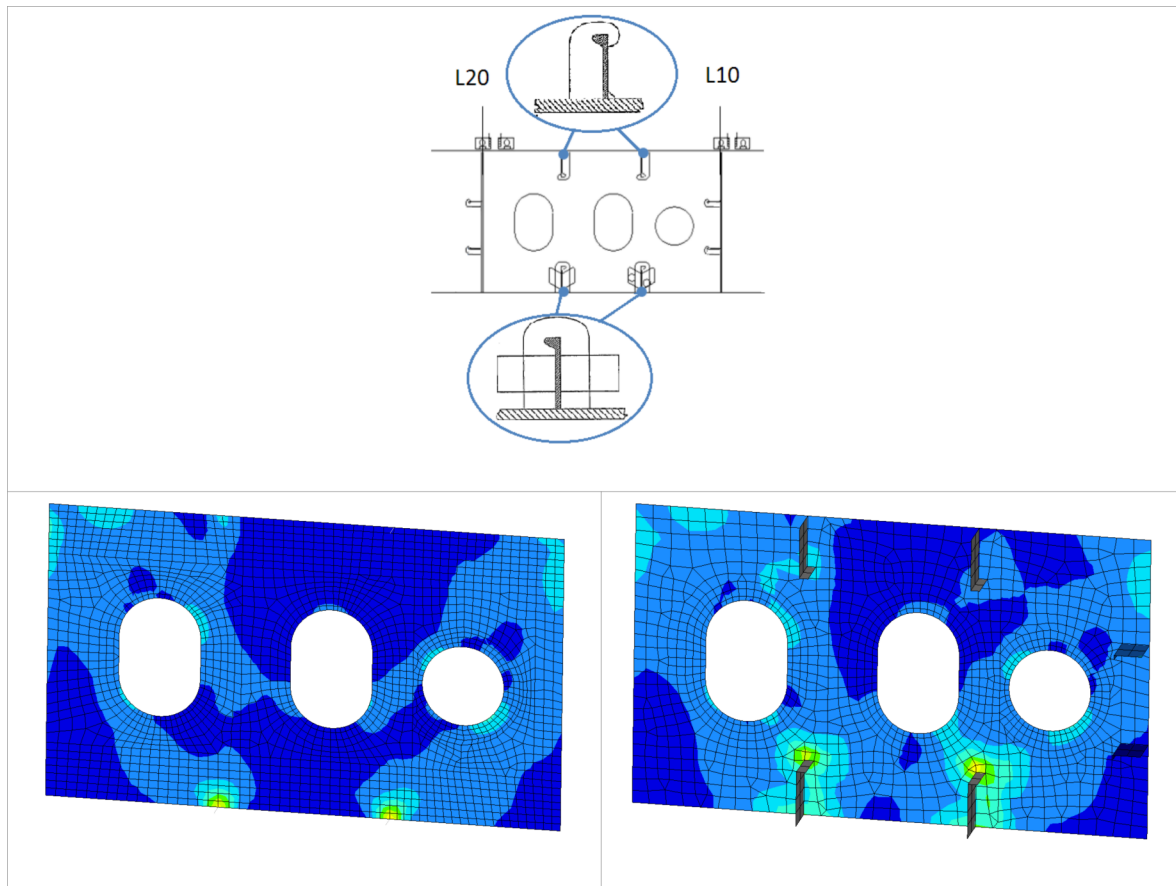


Abbildung 7.2: Spant-Anbindung an Bodenwrange 93

Eine gänzliche Vermeidung der sehr lokal auftretenden Überhöhungen bedarf einer deutlich feineren Diskretisierung bedingt durch die kleinen Ausrundungsradien. Dieser unverhältnismäßige Mehraufwand hat auf die Topologieoptimierung aber nur einen untergeordneten Einfluss. Qualitativ, spricht das von den Krafteinleitungsstellen aus in die Wrange hinein Spannungen abgebaut werden, ist das Ergebnis richtig. Zur Verdeutlichung und auch zur quantitativen Abschätzung bzw. zum Vergleich mit der jeweiligen Bodenwrange wird folgend eine Skalennormierung (120 N/mm^2) vorgenommen.

7.1.2 Festigkeitsniveau des optimierten Bauteils

Modell 1

Ziel bei Modell 1 war ein Leichtbaudesign durch moderate Topologieoptimierung. Sämtliche Anbindungen sollten erhalten bleiben. Dennoch hat, wie zu erwarten war, der Anteil höher belasteter Bereiche zugenommen. Inzwischen werden bei allen Anbindungen an die Bodenlängsspannten Spitzen erzielt. Spannungswerte kleiner als 30 N/mm^2 treten nur noch in Bereichen der Längsträger bzw. Beulsteifen auf. Insgesamt zeichnet sich ein der Ausgangskonfiguration sehr ähnliches aber homogeneres Spannungsbild der optimierten Bodenwrange ab, selbst bei Neuperforationen mit extrem geringen Ausrundungsradien (z.B. Langloch zwischen L0 und L10).

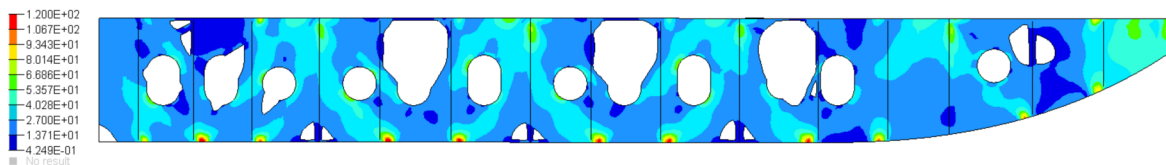


Abbildung 7.3: Vergleichsspannung BW 93 Topologieoptimierungsmodell 1 (incl. Anbindungen)

Modell 2

Der Konstruktionsvorschlag des Topologieoptimierungsmodells zwei unterscheidet sich deutlich von der Ausgangskonfiguration. Die Möglichkeit der Anbindung der Längsträger, nicht aber der (ursprünglichen) Beulsteifen, ist mit einbezogen worden. Damit entsteht aus der geschlossenen schon fast eine offene Bodenwrange. Wie Abbildung 7.4 zeigt, liegt ein homogenes Spannungsniveau vor. Überhöhte (irreale) Spitzenwerte treten wiederum an den Anbindungen der Hollandprofile auf, Bereiche mit kleinen Spannungen sind nochmals verringert worden. Bereiche um 40 N/mm^2 dominieren, die Streckgrenze des vorhandenen Baustahls von 355 N/mm^2 wird nie erreicht.

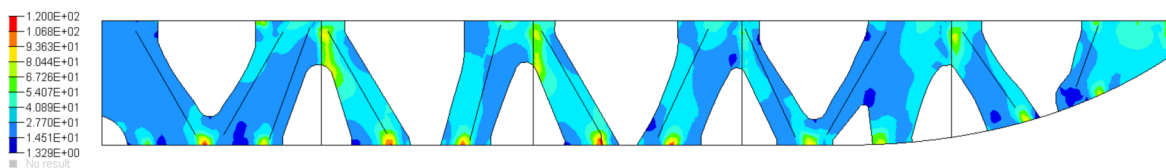


Abbildung 7.4: Vergleichsspannung BW 93 Topologieoptimierungsmodell 2 (incl. Anbindungen)

Fazit

Ein direkter numerischer Vergleich auf der Spannungsebene für die verschiedenen Konstruktionen der Bodenwrange ist mit Auswertung der Maximalwerte nicht sinnvoll. Modellbildungsbedingt treten diese immer an den Anbindungen der Bodenlängsspannten auf und liefern wie bereits beschrieben unrealistisch hohe Werte. So werden vergleichend drei geometrisch identische Stellen herangezogen, Abbildung 7.5:

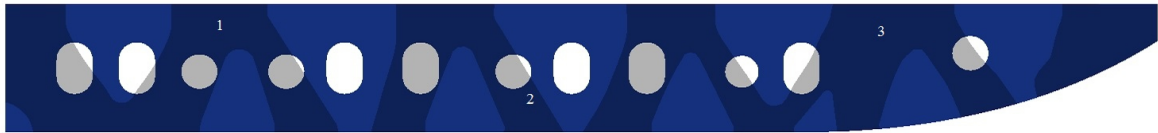


Abbildung 7.5: Ortsdefinition für numerischen Spannungsvergleich bei BW 93

In allen Modellen liegen die Punkte mitten im Untersuchungsgebiet, Punkt 1 an der Anbindung zu einem Längsträger, Punkt 2 in Feldmitte des mittleren Wrangensegmentes und Punkt 3 in der linken Hälfte des äußeren Segmentes.

Tabelle 29: Ergebnisvergleich BW 93 für ausgewählte Punkte

	Modell	Netzknoten- koordinate [y/z]	Vergleichsspannung nach von Mises [N/mm ²]
Punkt 1	Ausgangskonfiguration	2619.99 / 1340.46	60.29
	Modell 1	2619.99 / 1340.46	59.50
	Modell 2	2619.99 / 1333.8	81.09
Punkt 2	Ausgangskonfiguration	5737.15 / 325.848	31.19
	Modell 1	5737.15 / 325.859	32.24
	Modell 2	5749.19 / 326.69	36.69
Punkt 3	Ausgangskonfiguration	9691.92 / 754.665	24.23
	Modell 1	9691.91 / 754.683	24.64
	Modell 2	9651.51 / 733.961	27.64

Mit der Spannungsauswertung über alle Modelle lässt sich zunächst feststellen, dass das Niveau insgesamt sehr niedrig ist. Dies ist der physikalischen Modellbildung durch lineare Statik mit den vereinfachten Ansätzen zum Beispiel der natürlichen Randbedingungen nach den Klassevorschriften geschuldet. Die qualitative Verteilung der untersuchten Bodenwange ist aber korrekt abgebildet. Diese ist Grundlage für die Topologieoptimierung. Beim Modell 1 liegt der Schwerpunkt der Veränderungen in der sinnvollen Erweiterung der Perforationen. So sind die Netzkonfigurationen auch sehr ähnlich, alle Punkte haben geometrisch fast identische Netzknotenkoordinaten. Damit ist ein direkter Vergleich möglich, der zeigt, dass die Abweichungen in allen Punkten sehr gering sind. Modell 3 besitzt ein um fast 40% reduziertes Volumen respektive Masse. Folglich sind die v. Mises Vergleichsspannungen in allen Punkten höher. Aber selbst bei Punkt 1 mit einem Wert von $81,09 \text{ N/mm}^2$ beträgt die Steigerung nur ca. 30%.

7.2 Strukturanalyse Vorschiffbereich ConRo-Schiff

Am Bearbeitungsstand des Konzeptentwurfs ist eine vollständige Strukturanalyse nicht möglich, es fehlt phasenbedingt an Informationen. Dennoch ist es nötig, eine Validierung auch für das Beispiel Vorschiff vorzunehmen. Nur so können die gemachten Designvorschläge und letztlich auch das Anwendungspotential der Topologieoptimierung für die Konzeption beurteilt werden. Erfahrungsbasiert ist aus bekannten Informationen und mit Hilfe von Annahmen ein Stahldetailmodell eines Vorschiffs für den Schiffstyp ConRo-Fähre erstellt worden. Die Beschreibung sowie der Vergleich mit einer, den Optimierungsvorschlägen folgend, entwickelten Konstruktion in Bezug auf die Ergebnisse ist Gegenstand der folgenden Abschnitte. Der Festigkeitsnachweis wird mit der direkten Bemessung durchgeführt und beruht vereinfacht auf einer Spannungsanalyse.

7.2.1 Modellgenerierung

Funktionsmodell für das Vorschiff

Das Vorschiff ist Teil einer ConRo-Fähre und hat vor allem funktionale Aufgaben zu erfüllen. Deren Besonderheiten in Bezug auf Fahrgebiet und ähnliches sowie die Vielzahl der beteiligten Strukturbauteile sind bereits in Abschnitt 6.2.1 beschrieben worden. In Bezug auf das Funktionsmodell wird dabei eine Unterteilung in Quer- und Längsbauteile vorgenommen. Dieses hat sich auch aus fertigungstechnischer Sicht bewährt. Abbildung 7.6 zeigt die für das Beispiel modellierten Bauteile entsprechend der Verbandsteilung.

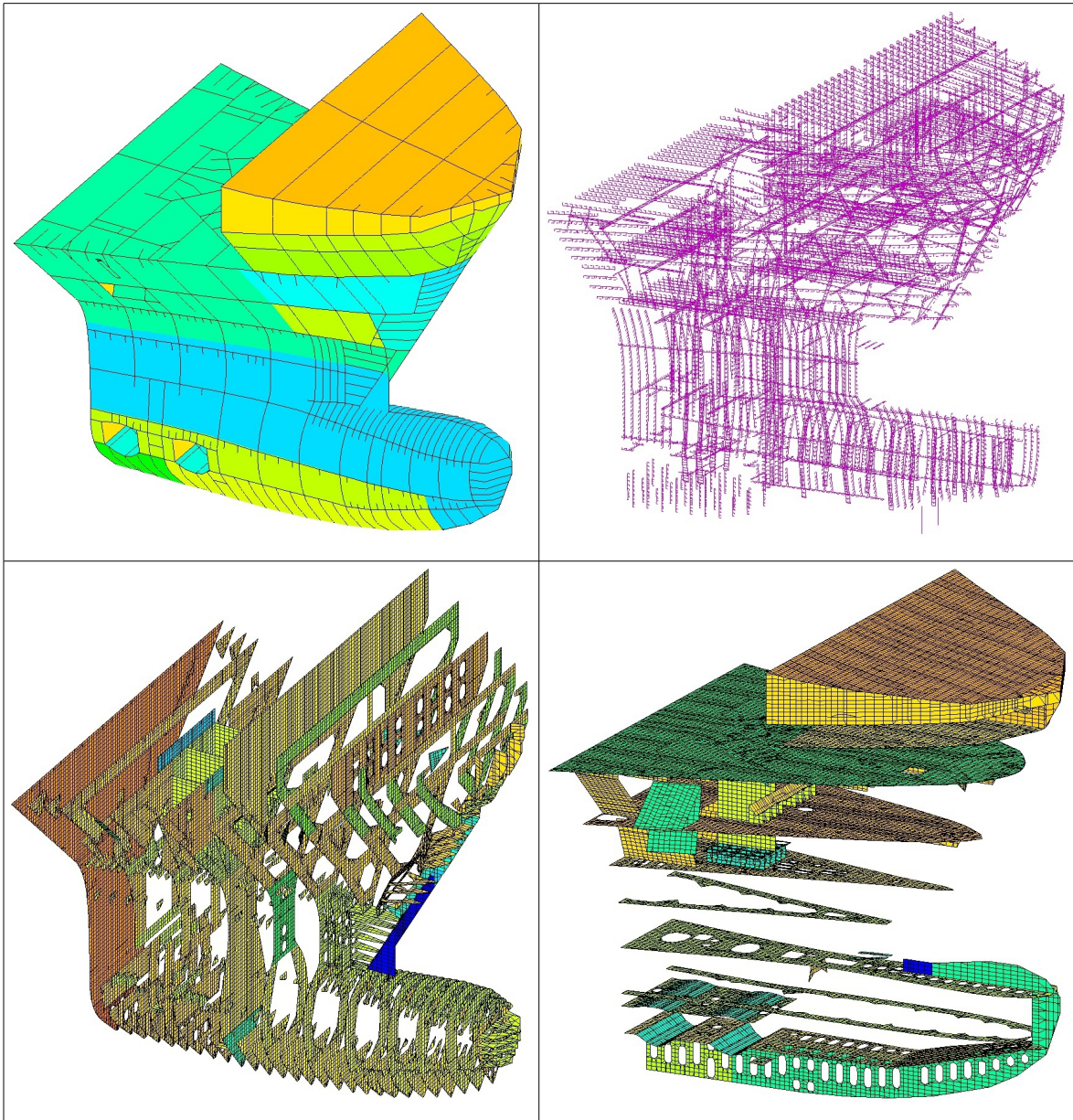


Abbildung 7.6: ISO-Ansicht (aus Poseidon) funktionaler Aufteilung des VS, oben links komplett, oben rechts HP-Profile, unten links Querverbände, unten rechts Längsverbände

Bemessungsmethode – Direkter Ansatz

Die ConRo-Fähre des gewählten Beispiels ist angelehnt an ausgelieferte Schiffe deutscher Werften. Dennoch existieren keine vollständigen bzw. abschließenden Modelle für den Vorschiffbereich. Für einen Festigkeitsnachweis ist daher zunächst die Geometrie zu modellieren. Dafür steht eine 3D-Beschreibung der Schiffsform zur Verfügung. Die angeschlossene Stahlschiffstruktur setzt sich dabei aus funktionalen Elementen in Quer- und Längsrichtung zusammen, adäquat dem fertigen funktionalen Modell der obigen Abbildung. Das Präprozessing wird mit Hilfe der von der Klassifikationsgesellschaft DNVGL zur Verfügung gestellten Software *GL Poseidon* [30] gelöst. Dies ist ein typischer

Softwarevertreter und für die Dimensionierung von Stahlstrukturen etabliert und weit verbreitet. Dem Beispiel zuträglich ist dabei das konsequente Orientieren der funktionalen Konstruktion am Spantraster. Das Programm ist angebunden an die Regeln der Klassifikationsgesellschaft DNVGL, daher können klasserelevante (Standard-)Lasten direkt in Eingabemasken auf die Struktur auftragen werden. Aus der funktionalen Geometrie lassen sich innerhalb des Programmes finite Elemente Modelle ableiten. Mit Hilfe des internen FE-Solvers ist es auch im Programm möglich, direkte Bemessungen für die generierten Lastfälle vorzunehmen. Und letztlich existiert ein Zusatztool, das einen Export der Modellierung zum allgemeinen finite Elemente Programm *ANSYS* [6] erlaubt. Auf diese Weise hat man die Möglichkeit, die Modelle und Ergebnisse der Topologieoptimierung samt korrespondierendem FE-Modell notwendigen Plausibilitätsprüfungen zu unterziehen. Da, wie sich im Folgenden zeigt, eine Vielzahl von Schritten notwendig ist, müssen die Modellimporte zwingend jederzeit überprüft werden.

In Abbildung 7.7 ist schematisch der Weg vom geometriebasierten Funktionsmodell zum finite Elemente Modell für die Topologieoptimierung dargestellt. Darin ist auch das zum jeweiligen Aufgabenfeld genutzte Softwarepaket genannt.

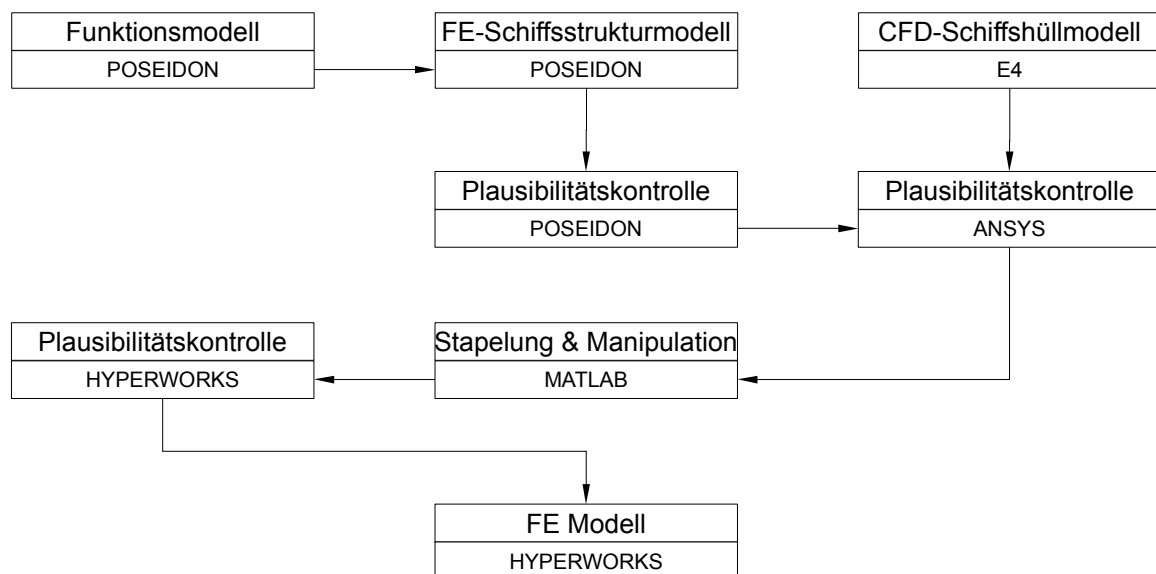


Abbildung 7.7: Schema zum Ansatz direkter Generierung eines FE-Modells aus der Schiffbauumgebung

Beginnend mit der Fertigstellung der Geometrie werden auch die Randbedingungen funktional aufgetragen. Mit Angaben zur Elementierung (Elementarten, Vorzugskantenlängen etc.) wird innerhalb des Programms ein finites Element Modell erzeugt. Bedingt durch die schwierige Geometrie (stark gekrümmter Vorschiffbereich) konnten Fehler in der Generierung nicht ausgeschlossen werden. Die Fehlerbehebung findet nun direkt in der FE-Umgebung des Programms statt. Und dadurch, dass ein Gleichungslöser und

Postprozessor vorhanden sind, kann zudem direkt in Poseidon eine Plausibilitätskontrolle stattfinden. Ein zur Verfügung stehendes Makro ermöglicht den anschließenden Modell-export und separate Lastfalldaten im ASCII-Format. Eine Plausibilitätsprüfung und ein Vergleich auf Verschiebungsebene bezüglich linearer finite Elemente Analyse ist nun möglich. Auf der anderen Seite ist bereits in Abschnitt 6.2.2 beschrieben, dass im Vorschiff eine wesentliche Belastung aus Seitenschlag resultiert. Mit Hilfe der Ergebnisse aus dem Forschungsprojekt *LASSE* [18] konnten hier Außenhautdrücke für einen Eintauchvorgang quertreibend zur See ermittelt werden. Diese liegen auch im ASCII-Format vor und sind mit dem FE-Programm ANSYS ausgewertet. Nach einer abermaligen Plausibilitätsprüfung der Daten können nun die Datensätze (Vernetzung und Randbedingungen) sinnvoll und zielführend verknüpft werden. Dafür sind in *Matlab* Programme geschrieben. Ziel der Manipulationen ist das Bereitstellen eines vollständigen FE-Modells in der Arbeitsumgebung des Optimierungsalgorithmus. Nach dem Einlesen wird dieses programmintern aufbereitet. Nun findet die endgültige Plausibilitätsprüfung statt. Es wird vergleichend (finite Elemente Analyse) das Resultat diverser Im- bzw. Exports sowie Manipulationen getestet. Letztlich steht ein durchgängig validiertes Simulationsmodell in der Optimierungsumgebung zur Verfügung.

FEM-Berechnungsmodell

Trotz der zeitlichen Einordnung in eine Konzeption nach Abschnitt 6.2, werden an dieser Stelle immer alle Bauteile des Funktionsmodells für die Vorschiffsstruktur modelliert. Es entsteht ein gekoppeltes Strukturmodell aus mechanischen zweidimensionalen Balken und dreidimensionalen Schalenelementen, Tabelle 30. Die dabei gewählte Elementkantenlänge richtet sich nach dem Spantraster des funktionalen Modells. Bei einem Bauspantabstand im Vorschiff von 750 mm wird eine Vorzugslänge von 150mm für den Netzerzeugungsalgorithmus eingestellt. Die Elementauswahl wiederum ist abhängig von den funktionalen Gegebenheiten. Die Kombination aus Schalenelementen für die Stahlplattenbereiche sowie gekoppelten Balkenelementen für die angeschweißten Walzprofile erweist sich da als sinnvoll. Dies ermöglicht auch eine bidirektionale Modellvalidierung, da sowohl *ANSYS* als auch *POSEIDON* die gleichen Elementformulierungen und Ansatzfunktionen verwenden. Da das Thema als besonders wichtig erachtet wird, müssen Abstriche in der Netzqualität hingenommen werden. Das betrifft vor allem funktionale Bereiche mit gekrümmten Begrenzungen wie den Bugwulst oder den Querschnitt der Bugstrahlruder. Dies resultiert aus den eingeschränkten Fähigkeiten bei der Erstellung in der schiffbaulichen Software *POSEIDON*. Dennoch sind im Rahmen einer Spannungsanalyse Verbesserungen der Netzqualität vorgenommen worden. Ohne Verlust der Vergleichbarkeit der beteiligten FE-Solver ist eine zufriedenstellende Qualität erreicht. Die Qualitätsangaben nach Tabelle 21 haben diesbezüglich Gültigkeit, da es sich dort auch um das Stahldetailmodell handelte.

Tabelle 30: Vernetzungsparameter des Validierungsmodells beim Vorschiff

Elementtyp	Kantenlänge Ø [mm]	Beschreibung	Elementanzahl
Schalenelement (Tria und Quad)	200	Quer- und Längsverbände, Außenhautbeplattung, Steven, Kettenkasten, Bugstrahlruder, ...	129729 + 40631
Elastischer 3D-Balken	200	Walzprofile im Vorschiff	21763

Die aufgetragenen Randbedingungen entsprechen denen des Bauraum- und Simulationsmodells für die Topologieoptimierung, siehe Abschnitt 6.2.2. Alle Belastungen, also sowohl die klasserelevanten als auch die Anteile aus Seitenschlag, mit den Ziffern von eins bis neun entsprechen Tabelle 22. Am Modellende achtern wird eine Einspannung an der zugehörigen Schottwand vorgenommen. Auch die Angaben zu den Materialeigenschaften besitzen für die Validierung weiterhin ihre Gültigkeit.

7.2.2 Ergebnisdiskussion der konventionellen Bauart

Die Bauteile des Vorschiffs sind verschiedenen Belastungen ausgesetzt. Dies führt zu Gefahren für die Struktur. Eine Analyse der Spannungen in den Bauteilen gibt Aufschluss über genau dieses Gefährdungspotential. Für die im Vorschiff auftretenden funktionalen Bauteilgruppen sind nach Tabelle 31 Belastungen und Gefahren benannt und zugeordnet.

Tabelle 31: Gefährdungspotential funktionale Strukturen im Vorschiff

Bauteilgruppe	Belastung / Verwendung	Gefahren
Außenhautbeplattung	Drücke aus Wellenschlägen / Slamming	Beulen, plastische Verformung
Quer- und Längsspannten	Aussteifung, Schubquerschnitt, Widerstandsmoment	Beulen und Drillknicken unter Druckbelastung, plastische Verformung
Stringer	Gurtung (Stringerdecks), Versteifung	
Rahmenspannten	Druck auf Außenhaut	
Balkenlagen	Drucklasten beider Schiffsseiten, Stringerabstützung	Knickgefährdung
Bugbänder	Versteifung des Vorstevens	Kollisionsgefährdung
Steven	Wellenschläge, Drücke und hydrodynamische Stöße	

Dabei gilt es zu beachten, dass die für diese Arbeit besonders wichtige Belastungsart Slamming von dynamischer Natur ist. Dies führt zu Besonderheiten in der Gefahren-

beurteilung: „Bei der Formgebung im Vorschiffsbereich sollte beachtet werden, dass ein starker Spantausfall oberhalb der Wasserlinie nicht nur zu sehr hohen örtlichen Slammingdrücken, sondern auch zu einer verstärkten Anregung von Whipping-Schwingungen des Schiffskörpers führt.“ [29]

Die Modellierung des Vorschiffs beruht auf dem Konzeptionsstatus. Das bedeutet, Raster Materialstärken und weitere bemessungsrelevante Informationen stellen im Modell eine erste Annahme bzw. Näherung dar. Für die direkte Bemessung mit einer finiten Elemente Analyse kann aus den vorgemachten Bemerkungen nur ein qualitativer Vergleich mit dem Designvorschlag stattfinden. Dies entspricht auch der Motivation für ein Entwicklungswerkzeug zur Verbesserung von Entwicklungszeit, Produktqualität und Anwendung.

Für die Analyse und Plausibilitätskontrolle wird zunächst der Vergleich der Ergebnisse der verschiedenen Solver herangezogen, siehe auch Abbildung 7.7. Grundlage bildet das Rechnerprogramm *POSEIDON*, das die Dimensionierung nach den Bauvorschriften automatisiert unterstützt. Die Software kann aber auch nach der Methode der finiten Elemente direkt bemessen. Als Paket ist es in den schiffbaulichen Konstruktionsabteilungen weit verbreitet und kann damit als Qualitätsbasis herangezogen werden. Auswertbar für das Vorschiff sind im Programm die Lastfälle 1 bis 4 entsprechend der Angaben in der Bauvorschrift. Sowohl für diese als auch für die Seitenschlaglastfälle aus CFD-Analysen muss mit dem Designvorschlag mindestens in Detailbereichen eine qualitative Verbesserung der Struktur sichtbar werden.

Durch die Vielzahl an Bauteilen in Kombination mit 9 Lastfällen können an dieser Stelle nicht alle Ergebnisse dargestellt werden. Dafür sei auf den Anhang Fehler: Referenz nicht gefunden verwiesen.

Wichtige Motivation für die Beispielwahl der Konzeptphase war die Prüfung der Auswirkungen von Seitenschlag auf die globale wie auch lokale Vorschiffsstruktur. Gegebenenfalls schaffen die Ergebnisse der Topologieoptimierung gezielt Abhilfe.

Aus Tabelle 22 mit der Beschreibung der natürlichen Randbedingungen ist zu entnehmen, dass Lastfall 8 ein repräsentativer Vertreter für diese Belastung darstellt. In Bezug auf das benannte Gefahrenpotential für die Strukturen im Vorschiff wird daher dieser im Folgenden untersucht. Abbildung 7.8. visualisiert die VON MISES Vergleichsspannungen für die Funktionsgruppen.

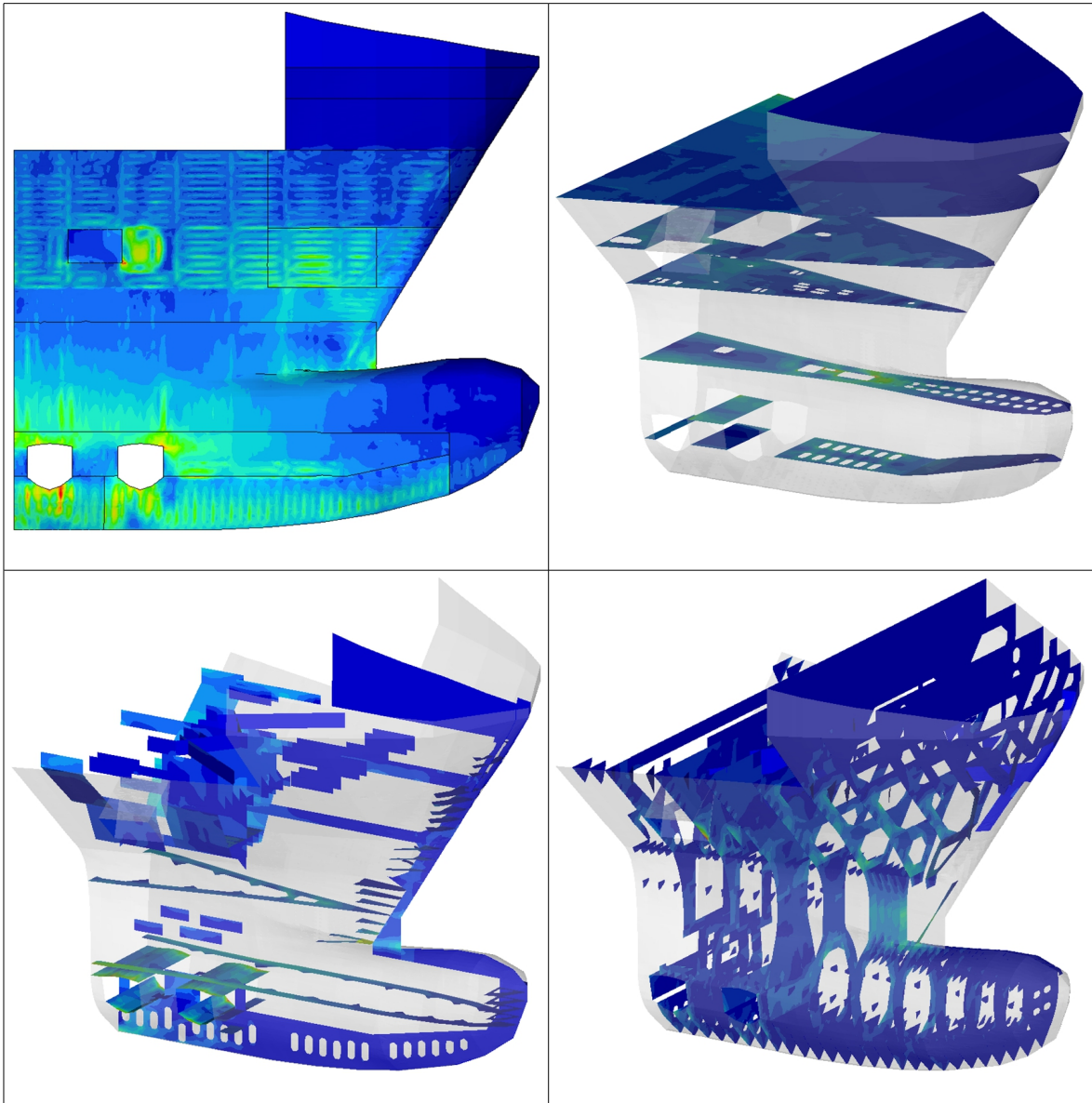


Abbildung 7.8: Plot der Vergleichsspannung untersuchter Baugruppen für Lastfall 8 in der Übersicht

Bei der Auswertung der Außenhaut im Bild oben links fallen zunächst vorhandene Spannungsspitzen im Bereich der Ankertaschenecke sowie der Randbereiche der Bugstrahlruder auf. Dies basiert auf Ungenauigkeiten der Vernetzung von *POSEIDON*. Es entstehen harte Punkte, die zu unrealistischen Spannungsspitzen führen und daher nicht weiter Beachtung finden. Darüber hinaus zeichnet sich ab, dass im Bugwulstbereich nur ein geringes Spannungsniveau vorhanden ist. Dafür aber sind im Oberwasserbereich signifikante Werte bis 220 N/mm^2 auszumachen, wobei deren qualitative Verteilung mit einigen aufgetretenen Schäden korreliert, vgl. Abbildung 6.17. Bei den anderen Funktionsgruppen sinkt das vorhandene Niveau (50 Prozent und mehr) für diesen Bereich aber deutlich, etwaige Schäden sind also nur ein lokales Phänomen der Außenhaut. Die

Decksstrukturen im Bild oben rechts weisen insgesamt ein relativ homogenes Niveau weit unterhalb der Streckgrenze auf. Höchste Belastung erfährt Deck 6.6, da es direkt in der Bugwulsteinlauflinie liegt und damit bei geringer Plattenbreite relativ viele Perforationen aufweist. Für die Längsbauteile, im Bild unten links, wiederum zeichnen sich die höheren Werte weiter achtern und im Unterwasserschiff ab. Darauf kann dann der Designvorschlag positiven Einfluss ausüben. Die Querbauteile entsprechend der Abbildung unten rechts sind vor allem in den Rahmenbereichen des Oberwasserschiffes sowie im Anschluss an die Stevenkonstruktion belastet. Die Spitzenwerte liegen hier durchaus im schädigenden Bereich, da ähnliche Werte wie bei der Außenhaut erreicht werden. Auch hier muss der Designvorschlag Einfluss nehmen.

Ein weiterer Aspekt der Validierung ist die Qualität des Optimierungsmodells. Dabei geht es weniger um die Kompromisse bezüglich Netzgüte, Randbedingungen und ähnlichem. Vielmehr gilt es zu untersuchen, ob auf dem Weg zum Optimierungsmodell alles richtig übersetzt wurde. Infolge fehlender Schnittstellen, sind Automaten für das Matching entsprechend Abbildung 7.7 geschrieben. Zu Validierungszwecken sind die Modelle der Zwischenschritte in den nativen Programmen gelöst und ausgewertet. So kann a posteriori die Modellgüte zum Zeitpunkt des Zwischenschrittes vergleichend untersucht werden. Für die übergebenen Lastfälle nach Bauvorschrift ergibt sich demnach eine sehr gute Übereinstimmung. Die auszugsweise Auflistung der folgenden Tabelle markiert mittlere Differenzen von 10 Prozent, was eine korrekte Übergabe der Modellinformationen vom anfänglichen Stahlentwurfsmodell (*Poseidon ND*) bis zum Optimierungsmodell in der gewählten Topologieoptimierungsumgebung (*Optistruct*) bestätigt.

Tabelle 32: Ausgewählte Werte von Mises Vergleichsspannung für das Vorschiffstahlmodell

Funktionsgruppe	Lastfall	Solver	Vgl.-Spannung [N/mm ²]	Beschreibung
Außenhautbeplattung	3	Poseidon	51,9	Element ID 56803 (über hi. Bugstrahlruder) Lage x = 186,50 m Lage z = 8,28 m (Eislastbereich)
		Ansys	62,84	
		Optistruct	59,72	
Decks- und Längsträger	2	Poseidon	124	Element ID 83956 (über vo. Bugstrahlruder) Lage x = 188,75 m Lage z = 8,8 m (Stringerdeck)
		Ansys	119,4	
		Optistruct	128,6	
Querträger	1	Poseidon	54,4	Element ID 105587 (Rahmen Stevenwurzel) Lage x = 195,75 m Lage z = 8,50 m (unter Stringerdeck)
		Ansys	52,38	
		Optistruct	60,44	

7.2.3 Ergebnisdiskussion für das optimierte Vorschiff

Das Kraftpfadlayout lieferte die Erkenntnis, dass die drei Blöcke der natürlichen Randbedingungen im Vorschiffbereich vordergründig lokal abgetragen werden. Darauf zugeschnitten sind Vorschläge erarbeitet. Ein erster wichtiger Einwirkungsblock ist der Bodenschlag. Dieser ruft Elementdichteanhäufungen im Pfaddesign hervor (Abbildung 6.29 rechts), die in der Auswertung mit den Ziffern 2 und 3 markiert sind. Als Konstruktionsvorschlag ist eine Verstärkung des Stringerdecks in Höhe der Markierung Nummer 2 vorgesehen, Abbildung 6.31. In der validierenden Spannungsanalyse wirkt sich dieser Vorschlag positiv aus. Am deutlichsten ist dies natürlich für den Bodenschlagslastfall Nummer 4 zu sehen. Die zugehörige Visualisierung dieses Details zeigt deutlich, dass die Spannungen durch die neue Struktur abgetragen werden können.

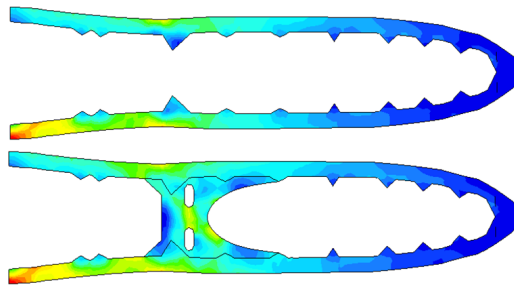


Abbildung 7.9: Vergleichsspannung LF 4 des Details Stringerdeck, oben konventionelle und unten Neukonstruktion

Ein zweiter wichtiger Belastungsblock für das globale Vorschiff sind die Eislasten. Die Stahlschiffstruktur ist in diesen Bereichen ausreichend dimensioniert. Einzig an der Stevenwurzel bei der Bugwulsteinlaufelinie, liefern die Topologieoptimierungsergebnisse Elementanhäufungen großer Materialdichte, Abbildung 6.32. Konstruktiv sind in diesem Bereich Erhöhungen der Blechdicke um circa 10 Prozent vorgenommen. Die Spannungsauswertung aller Lastfälle spiegelt auch die Geringfügigkeit des Bedarfs wider. Dabei zeigt sich aber auch, dass nicht die Eislasten sondern nur die Seitenschlaglastfälle Veränderungen hervorrufen. Wie in der folgenden Abbildung dargestellt, verringert sich das Spannungsniveau um ca. 10 Prozent.

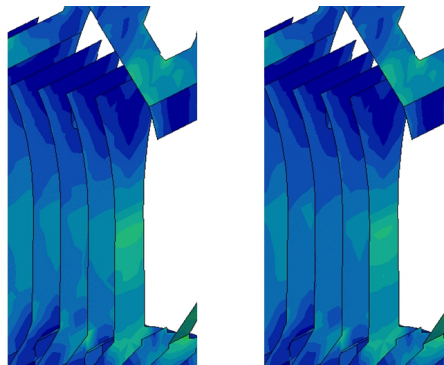


Abbildung 7.10: Vergleichsspannung des Details Rahmenverstärkung für LF 3 an Position 4

Die Belastungen aus Seitenschlag sind für die Topologieoptimierung der wichtigste Block natürlicher Randbedingungen. Hieraus resultiert die Motivation zur Wahl dieses schiffbaulichen Strukturbeispiels, da es in der Vergangenheit vermehrt zu entsprechenden Schäden im Oberwasserbereich des Vorschiffs kam. Aus der Markierung 6 der Ergebnisaufzeichnungen, sind im Rahmen des Designvorschlags entlang eines diagonalen außenhautnahen Kraftpfades neue Kniebleche hinzugekommen bzw. 10 prozentige Blechverstärkungen vorgenommen worden. In der Auswertung der zugehörigen Lastfälle zeigt sich dann auch die Verbesserung. Die eingebrachte Energie wird durch die Neuerungen besser abgeleitet, das Niveau der Vergleichsspannungen sinkt in diesem Bereich um ungefähr 10 Prozent, das Schädigungspotential sinkt.

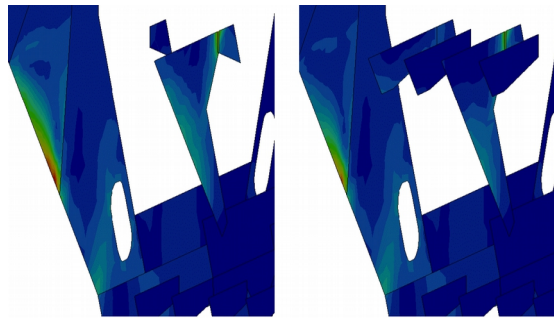


Abbildung 7.11: Vergleichsspannung für LF 8 von Ankertaschendetails an Position 6

Fazit

Insgesamt sind wenig Veränderungen im Überblick des vergleichenden Spannungsniveaus auszumachen. Aber das auch eine globale Verbesserung vorhanden ist, beweist der Steifigkeitszuwachs von 1,5 Prozent für die Gesamtkonstruktion des optimierten Vorschiffs. Die Verbesserungen kommen aber etwas deutlicher in den veränderten Details zum Tragen. Aber auch hier zeigt sich, dass bereits die zugrunde liegende konventionelle Konstruktion allen Belastungen fast immer genügt. Besteht die Absicht sich auf Basis der Topologieoptimierung davon noch weiter sichtbar zu lösen, geht das nur mit zwei Ansätzen. Zum einen können durch einen zeitlich noch früheren Start der Berechnungen restringierende Stahldetails wegfallen. Zum zweiten muss eine weitere Lösung von bisher vorgenommenen Fertigungsrestriktionen vorgenommen werden. Dies wird Gegenstand des Ausblicks dieser Dissertation.

Aus den Schäden der Vergangenheit infolge Seitenschlag galt als besonderes Augenmerk für die Anwendung der Topologieoptimierung aber auch die Analyse der Schadenssensitivität aus der Korrelation Oberwasserschiff und Seitenschlag. Das erzielte Kraftpfadlayout lieferte für diesen Bereich des Vorschiffs „nur“ einen diagonalen Pfad parallel an Außenhaut. Damit ist bewiesen, dass die Seitenschlagslasten bei der gewählten Konstruktion vordergründig lokal abgetragen werden. Die Spannungsanalyse bestätigt dieses Ergebnis.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Bedingt durch den starken Willen asiatischer Länder zur Vormachtstellung im Schiffbau, befinden sich europäische bzw. deutsche Werften nach wie vor in einer starken Umbruchphase. Wichtigste Reaktionen hiesiger Schiffbauer darauf, sind das Erweitern des Aufgabenspektrums genauso wie die Fokussierung auf den Spezialschiffbau. Für die beteiligten Konstruktionsabteilungen bedeutet das aber auch die weitere Hinwendung zum wertschöpfungsintensiven Bau von Unikaten und Sonderkonstruktionen. Daher muss in allen Bereichen der Schiffsentstehung, so auch der Stahlstrukturdimensionierung, immer wieder nach Möglichkeiten der Verbesserung gesucht werden.

Die materielle Topologieoptimierung, als Werkzeug für das strukturelle Verbesserungspotential komplexer Bauteile, hat sich mittlerweile langjährig sehr erfolgreich profiliert. Industrielle Anwendung findet sie vor allem in Industriezweigen mit Serienproduktion wie dem Automobilbau oder auch der durch langfristige Konstruktionszyklen geprägten Luft- und Raumfahrttechnik.

In der Dissertation wird diese Methode der Strukturoptimierung aufgegriffen und untersucht, inwieweit es möglich ist, solche Algorithmen auf schiffbauliche Konstruktionsmechanismen und Entwicklungszyklen zu übertragen. Dabei wird qualitativ in zwei Stufen vorgegangen, systemtheoretisch und anwendungspraktisch, was zu folgenden Ergebnissen führt.

Systemtheoretische Stufe schiffbaulicher Implementierung

Ziel der Dissertation war die Entwicklung und Anwendung neuer Konstruktionshilfen basierend auf der materiellen Topologieoptimierung für schiffstechnische Konstruktionen. Da sich das konstruktive schiffbauliche Umfeld in vielem zu anderen großen Industriezweigen unterscheidet, gibt es bisher keine Methodik zur praktischen schiffbaulichen Implementierung. Dies und der Fakt, dass und vor allem warum bisher nur vereinzelte Ansätze Einzug gehalten haben, sind Schwerpunkte der Kapitel 1 bis 3. Das dennoch die Methoden der materiellen Topologieoptimierung für schiffstechnische Konstruktionen anwendbar sind, wird in Kapitel 4 und 5 erläutert. Mit einer eingehenden Analyse der systemtheoretischen Grundlagen, werden hier Implementierungsansätze entwickelt und mit Hilfe eigener Programmroutinen direkt getestet. So eignen sich bereits vereinfachte, etablierte und robuste Algorithmen der Strukturoptimierung für den Einstieg.

Als wichtig für eine weitere praktische Anwendbarkeit haben sich in dieser Dissertation eher praktische Hürden erwiesen. Es sind keine ausreichenden Schnittstellen zwischen den beteiligten Softwarepaketen für ein sicheres Optimierungsmodell vorhanden. Dies wiegt umso schwerer, wenn das Modell komplexer wird. Ein weiterer wichtiger Aspekt sind das

fehlende Knowhow der involvierten Abteilungen. Für das Gelingen der Anwendbarkeit dieser Konstruktionshilfen gilt es gezielt zu schulen. Darauf zugeschnitten sollte die anwendungspraktische Überführung schrittweise erfolgen.

Anwendungspraktische Implementierungsstufe

Für die praktische Überführung in das schiffbauliche Konstruktionsumfeld eignet sich die ARISTOTELISCH synthetisch induktive Verallgemeinerung nach Kapitel 6 dieser Dissertation. Startend mit begrenzten strukturellen Details, wird bei diesem Ansatz sukzessive zu verallgemeinerten komplexen Großstrukturen übergegangen. Schritte sind dabei erstens die Detailkonstruktion, dann das Konzeptdesign und schließlich die Möglichkeit bzw. der Ausblick auf neue Bauweisen.

Für die Detailkonstruktion wurde die Anwendbarkeit in dieser Dissertation an Beispielen gezeigt. Mit dem Ziel der Gewichtsminimierung konnte am Beispiel Bodenwrange erfolgreich die Masse um über 30 Prozent reduziert werden (bei Spannungsrandbedingungen). Weiterhin wurde gezeigt, wie auch eine Verbesserung von Details durch ein Verfahren der bionischen Formoptimierung erzielt werden kann. Mit dem Ziel der Erhöhung der maximal zulässigen Lastschwingzahl durch Reduktion der Kerbwirkung ist die Oberflächenkontur von Knieblechen zielgerichtet angepasst worden. Diese Beispiele verdeutlichen die schnelle Machbarkeit und auch das immer noch vorhandene Potential gerade in dieser späten Entwicklungsphase.

Mit dem Blick auf größere Strukturverbände ist auch der nächste Schritt in Richtung Konzeptionsphase, zurück in der Zeitschiene der Entwicklung, zu richten. Dies ist inzwischen auch anwendungspraktisch in den Konstruktionsabteilungen realisierbar. Die dem Optimierungsmodell zugrunde liegenden finiten Elemente Modelle sind mittlerweile sehr frühzeitig verfügbar, meist schon am Beginn einer Konzeption. Je nach Zielfunktion der Optimierung können sogar die relativ grob vernetzten Modelle für die numerische Modellbildung ausreichen. Im Rahmen der Dissertation ist dieser Schritt für das Beispiel Vorschiff entwickelt und analysiert worden. Trotz weitreichender Modelldetaillierung in Bezug auf geometrische vor allem aber natürliche Randbedingungen, zeigte sich relativ wenig Veränderungsbedarf für die Gesamtkonstruktion. Dies bestätigten auch validierende Spannungsanalysen, beschrieben in Kapitel 7 dieser Arbeit. Aber anders als angenommen, stellte sich heraus, dass keine ausgesprochene Sensibilität gegenüber den natürlichen Randbedingungen vorhanden ist. Das heißt aufgrund der üblichen Herangehensweise im Schiffbau, ist für die Topologieoptimierung dieser Phase die Qualität wichtiger als die Quantität. Sodass neben den hier verwendeten CFD-Ergebnissen auch sehr viel üblichere Hilfsmittel und in der Konzeptionsphase vorliegende Hilfsmittel eingesetzt werden können [z.B. DNV-GL shipload].

Die Topologieoptimierung versetzt den Konstrukteur aber auch in die Lage über gänzlich

neue Konstruktionen nachzudenken. Auch für das gewählte Beispiel Vorschiff fanden sich Hinweise auf neue Bauweisen, es ist also auch für die schiffbauliche Konstruktion denkbar und damit der finale Schritt einer Implementierung. Im Hinblick auf die visuellen Ergebnisse der Topologieoptimierung ist markant, dass die Elementanhäufungen großer Dichte oft diagonal verlaufen. Weiterhin ist das Layout auch als Fachwerkstruktur interpretierbar. So existieren Kraftäste mit ausgesprochener Zugbelastung. Aus diesem Ansatz heraus ließe sich für die Zukunft ein Alternativvorschlag zur globalen Versteifung des Vorschiffbereiches entwickeln. Am Beginn einer Konzeption scheint die Möglichkeit einer solchen Lösung aufgrund des noch vorhandenen größeren Spielraums gegeben. Dafür spricht auch die eingangs geschilderte Spezialisierung deutscher Schiffbauer auf den Spezialschiffbau.

Mechanische Grundlage bildet die Analogie eines Zugseils. In einer vereinfachten Näherung ist das Schiff bzw. Vorschiff bereits als dünnstegiger Kastenträger benannt worden, Kapitel 6.2.1. Für eine visuelle Verdeutlichung des Prinzips eignet sich auch der dargestellte Rohrquerschnitt:

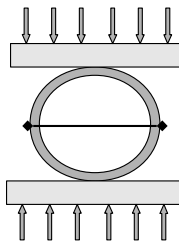


Abbildung 8.1: Veranschaulichung der Zugseilwirkung

Natürliche Randbedingungen des Systems sind flächige Druckbelastungen, analog zum Seeschlag beim Schiff. Diese führten zu einer Kompression des Querschnittes, bei obiger Analogie in Form einer Ellipse. Die Einführung eines Stabes quer zur Belastungsrichtung wirkt der Längung entgegen. Es kommt zu einer starken Zugspannung im Stab. Nun gilt es zu analysieren, inwieweit dieser Wirkmechanismus auf schiffstechnische Konstruktionen übertragen werden kann. Ein großer Vorteil des Systems ist das günstige Verhältnis von Zugfestigkeit zu Masse Stahl. Damit hat eine solche Bauweise großes Leichtbaupotential, wobei aber auch Nachteile in Form fehlender Konstruktions- und Fertigungserfahrungen der ausführenden Werften zu sehen sind. Obwohl dies eher als langfristige Alternative in Frage kommt, sind solche Tragsysteme gerade im Schiffbau nicht unbekannt. Sogenannte Laschsysteme für die Ladungssicherung funktionieren auf ähnliche Weise und werden tagtäglich eingesetzt. Hier ist sogar das Prüfen bis hin zum kontrollierten Aufbringen von Vorspannkräften zur gezielten Steuerung der Struktursteifigkeit beteiligter Systeme möglich.

Letztlich zeigt die Dissertation, dass in der Anwendung materieller Topologieoptimierung zum Teil erhebliches Potential für die schiffstechnischen Konstruktionen steckt. Es gilt diesen Weg daher konsequent weiter zu bestreiten.

9 Literatur

- [1] Achtziger, W.; Bletzinger, K.-U.; Svanberg, K. (1998): Advanced topics in structural optimization. Lyngby, The Danish Center for Applied Mathematics and Mechanics, Techn. Univ. of Denmark
- [2] Altair Engineering, Inc.(2014): HyperWorks 13.0 Users Guide, Troy/Michigan, Altair Engineering, Inc.
- [3] American Bureau of Shipping- ABS(2014): Safehull Finite Element Analysis of Hull Structures. <http://ww2.eagle.org/content/eagle/en/rules-and-resources/rules-and-guides.html> , Zugriff am 09.01.2015
- [4] Amorosi, St. (2006): Application of topology, size and shape optimization on the 787 wing leading edge Structure. In: Altair - HTC 2006
- [5] Andreassen, E.; Clausen, A.; Schevenels, M.; Lazarov, B. S.; Sigmund, O. (2011): Efficient topology optimization in MATLAB using 88 lines of code. Structural and Multidisciplinary Optimization 43(1), S. 1-16
- [6] ANSYS, Inc. (2014): ANSYS Academic Research Mechanical. Release 15.0 Ansys Help
- [7] Argyris, J. H.; Mlejnek, H.-P. (1997): Die Methode der finiten Elemente. Braunschweig, Vieweg
- [8] ATZ online: <http://www.atzonline.de/Aktuell/Interviews/35/106/Ein-Ingenieur-ist-heute-hundertmal-produktiver.html> , Zugriff am 14.05.2012
- [9] Baier, H.; Seesselberg, C.; Specht, B. (1994): Optimierung in der Strukturmechanik. Braunschweig ;, Wiesbaden, Vieweg
- [10] Bathe, K.-J. (2002): Finite-Elemente-Methoden. Berlin [u.a.], Springer, 2. Aufl.
- [11] Baud, R. V. (1934): Beiträge zur Kenntnis der Spannungsverteilung in prismatischen und keilförmigen Konstruktionselementen mit Querschnittübergängen. Promotionsarbeit techn. Wiss. Techn. Hochschule Zürich. Zürich G. v. Ostheim
- [12] Beckert, B. A. (2009): Structural Optimization takes Shape. In: Concept to Reality. Troy/Michigan, Altair, Inc.
- [13] Bendsoe, M. P.; Kikuchi, N. (1988): Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering 2(71), S. 197–224

-
- [14] Bendsøe, M. P.; Kikuchi, N. (1991): Topology and layout optimization of discrete and continuum structures. Lyngby, Matematisk Inst. Danmarks Tekniske Højskole
- [15] Bendsøe, M. P.; Olhoff, N. (2006): IUTAM Symposium on Topological Design Optimization of Structures, Machines and Materials. Status and perspectives ; [held at Rungstedgaard, near Copenhagen, Denmark, October 26 - 29, 2005]. Dordrecht, Springer
- [16] Bendsøe, M. P.; Sigmund, O. (2004): Topology optimization. Theory, methods, and applications. Berlin ;, New York, Springer, 2. Aufl.
- [17] Bertram, V., Maisonneuve, J. ; Rigo, P.(2005): Cost Assessment in Ship Production . RINA. <http://hdl.handle.net/2268/1328>, Zugriff am 26.05.2014
- [18] Billberbeck, H., u.a. (2010): LaSSe, Lasten auf Schiffe im Seegang, Abschlußbericht zum BMWi Teilvorhaben. Förderkennzeichen 03 SX 218. Flensburger Schiffbau-Gesellschaft mbH & Co. KG, Flensburg
- [19] Blachut, J.; Eschenauer, H. (2001): Emerging methods for multidisciplinary optimization. Wien ;, New York, Springer
- [20] Bletzinger, K.-U. (1990): Formoptimierung von Flächentragwerken. Dissertation, Univ Stuttgart, Stuttgart
- [21] Bletzinger, K.-U.; Firl, M.; Daoud, F.(2005): Techniken der Formoptimierung. In: Weimarer Optimierungs- und Stochastiktage
- [22] Bronsart, R. (2008): Rechnergestützte Methoden I. Vorlesungsskript. Universität Rostock, Rostock
- [23] CE (2012): FSG erhält Auftrag für multifunktionale Schwergut-Transportschiffe. 2014 Auslieferung von zwei Neubauten an niederländische Unternehmen. HANSA, International Maritime Journal 149(4), S. 23–24
- [24] Cerverella, P. (2008): Integration of Optimization Methods into the Aircraft Structural Design Process at Subsystem and Component Level. PhD Thesis, Universita di Padova / Politecnico di Milano, Padua Italy
- [25] Christensen, P. W.; Klarbring, A. (2009): An introduction to structural optimization. [Dordrecht], Springer
- [26] Conic, M.; Hillebrand, A. (2009): Topology Optimization of a Concept Car Body in the Early Design Phase. Ludwigsburg, Altair HTC 2009. European HyperWorks Technology Conference

-
- [27] Cruises, A.: AIDA Neubauten für Ganzjahres-Einsatz im Norden konzipiert. <http://www.aida.de/nc/b2b-corporate-site/presse/pressemeldung.19052/article/aida-neubauten-fuer-ganzjahres-einsatz-im-norden-konzipiert.html/>, Zugriff am 10.05.2012
- [28] Deschler, A. (2011): Topology Optimization of a Ship Gearbox Housing. Ludwigsburg, Altair HTC 2011. European HyperWorks Technology Conference
- [29] DNV GL SE (2014): Rules for Classification. Chapter 1. <https://exchange.dnv.com/servicedocuments/dnvgli/>, Zugriff am 09.01.2015
- [30] DNV GL SE (2014): Hull Design Software POSEIDON Version 14.0 User Manual Edition 2014
- [31] Dudzus, A.; Danckwardt, E. (1982): Schiffstechnik. Einführung und Grundbegriffe. Berlin, Verl. Technik, 1. Aufl.
- [32] Dudzus, A.; Grau, S.: Aufbau einer Maritimen Allianz in der Ostseeregion, Abschlußbericht zum Verbundprojekt 6, <http://edok01.tib.uni-hannover.de/edoks/e01fb05/493467270.pdf>, Zugriff am 26.06.2013
- [33] Düster, A.; Parvizian, J.; Rank, E. (2010): Topology optimization based on the finite cell method. PAMM 10(1), S. 151–52
- [34] Eschenauer, H.; Mattheck, C.; Ohloff, N. (1992): Engineering optimization in design processes. Proceedings of the international conference, Karlsruhe Research Center, 1990. Berlin, New York, Springer-Verlag
- [35] Eschenauer, H.; Olhoff, N.; Schnell, W. (1997): Applied Structural Mechanics. Fundamentals of Elasticity, Load-Bearing Structures, Structural Optimization. Berlin, Heidelberg, Springer
- [36] Evans, J. H. (1959): Basic design concepts. Journal of the American Society for Naval Engineers, 71(4), S.671-678.
- [37] Eyres, D. J. (2007): Ship construction. Oxford, Butterworth-Heinemann, 6. Aufl.
- [38] Ferreira, A. J. M. (2008): MATLAB codes for finite element analysis. Solids and structures. Dordrecht, London, Springer
- [39] Firl, M. (2010): Optimal shape design of shell structures, Techn. Univ, München, München
- [40] Firl, M.; Wüchner, R.; Bletzinger, K.-U. (2013): Regularization of shape optimization problems using FE-based parametrization. Structural and Multidisciplinary Optimization 47(4), S. 507–21

- [41] Fleury, C. (1986): Structural optimization: a new dual method using mixed variables. *International journal for numerical methods in engineering* 23(3), S. 409–28
- [42] Fricke, W. (2005): Strukturanalyse von Schiffen I. Vorlesungsmanuskript der Technischen Universität Hamburg-Harburg. Hamburg
- [43] Fricke, W. (2006): Grundlagen der Schiffskonstruktion. Vorlesungsmanuskript der Technischen Universität Hamburg-Harburg. Hamburg
- [44] Fricke, W.; Bronsart, R. (Hg.) (2012): Proceedings of the 18th International Ship and Offshore Structures Congress. Hamburg, Schifffahrts-Verl. "Hansa", 1. Aufl.
- [45] Gasch, R., & Twele, J. (Eds.). (2010). Windkraftanlagen: Grundlagen, Entwurf, Planung und Betrieb. Springer
- [46] Gaspar, B.; Teixeira, A.; Guedes Soares, C.; Wang, G. (2011): Assessment of IACS-CSR implicit safety levels for buckling strength of stiffened panels for double hull tankers. *Marine Structures* 24(4), S. 478–502
- [47] Gebhardt, C. (2011): Praxisbuch FEM mit ANSYS Workbench. Einführung in die lineare und nichtlineare Mechanik. München, Hanser
- [48] Gimperlein, D.; Eggert, L.: Integration globaler Festigkeits- und Schwingungsuntersuchungen in den Konstruktions- und Berechnungsprozess. In: *Jahrbuch der Schiffbautechnischen Gesellschaft*, S. 43–53
- [49] Gockenbach, M. S. (2006): Understanding and implementing the finite element method. Philadelphia, PA, Society for Industrial and Applied Mathematics
- [50] Grafe, W. (1996): Der Einsatz von CA-Techniken in der frühen Konstruktionsphase einer schiffbaulichen Stahlstruktur, Univ, Harburg, Hamburg
- [51] Grafe, W. (1999): Modellierungsmethoden für Berechnungsmodelle der Stahlstruktur entsprechend der Softwareumgebung der Werft. Universitätsbibliothek u. Technische Informationsbibliothek, Hannover, unveröffentlicht
- [52] Grötschel, M. (2009): Produktionsfaktor Mathematik. Wie Mathematik Technik und Wirtschaft bewegt. Berlin, Springer
- [53] Grötschel, M.; Lucas, K.; Mehrmann, V. (Hg.) (2009): Simulationsbasierte Optimierung in der Bautechnik — Neue Informatische Lösungskonzepte. Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg
- [54] Guedes Soares, C. (2011): Advances in marine structures. Proceedings of the 3. International Conference on Marine Structures - MARSTRUCT 2011, Hamburg, Germany, 28 - 30 March 2011. Boca Raton, Fla, CRC Press

-
- [55] Haftka, R. T.; Gürdal, Z.; Kamat, M. P. (1990): Elements of structural optimization. Dordrecht, Kluwer Acad, 2. Aufl.
- [56] Harlander, L.: Optimum Plate Stiffener Arrangement for Various Types of Loading. SNAME. In: Journal of Ship Research, S. 49–65
- [57] Hartmann, F.; Katz, C. (2002): Statik mit finiten Elementen. Mit 25 Tabellen. Berlin [u.a.], Springer
- [58] Harzheim, L. (2008): Strukturoptimierung, Grundlagen und Anwendungen. Frankfurt a. M., Wissenschaftlicher Verlag Harri Deutsch GmbH, 1. Aufl.
- [59] Harzheim, L., Graf, G., Roth, M. (2008): Konstruktion optimaler Gussteile mit Hilfe der Topologieoptimierung. Tagungsband NAFEMS Seminar „Simulation Driven Design – Potential and Challenges“, Wiesbaden
- [60] Harzheim, L.; Graf, G. (2002): Topshape: An Attempt to Create Design Proposals Including Manufacturing Constraints. International Journal of Vehicle Design 28(4), S. 389-409
- [61] Harzheim, L., Mattheck, C.: 3D-Shape Optimization (1991): Different Ways to an Optimized Design, Lecture Notes in Engineering 63, Engineering Optimization in Design Processes, Proceedings of the International Conference, Karlsruhe Nuclear Research Center, Germany, Springer, S. 173-179
- [62] Hessel, C. (2003): Integration der Topologieoptimierung in den CAD-gestützten Entwicklungsprozess. Aachen, Shaker
- [63] Hsieh, T.-H.; Chen, J.-J. J.; Chen, L.-H.; Chiang, P.-T.; Lee, H.-Y. (2011): Time-course gait analysis of hemiparkinsonian rats following 6-hydroxydopamine lesion. Behavioural Brain Research 222(1), S. 1–9
- [64] Hougardy, P. (2011): Topology Optimization of of Engine and Gearbox Mount Castings. Ludwigsburg, Altair HTC 2011. European HyperWorks Technology Conference
- [65] Hughes, T. J. R. (2000): The finite element method. Linear static and dynamic finite element analysis. Mineola, NY, Dover Publications
- [66] IACS-International Association of Classification Societies (2012): Common Structural Rules for Double Hull Oil Tankers. <http://www.iacs.org.uk/>, Zugriff am 14.10.2013
- [67] Kaeding, P.; Prof. Dr.Eng./Hiroshima Univ. (2012): Berechnung schiffbaulicher Konstruktionen I. Vorlesungsmanuskript. Universität Rostock, Rostock
- [68] Kaeding, P.; Prof. Dr.Eng./Hiroshima Univ. (2012): Berechnung schiffbaulicher Konstruktionen II. Vorlesungsmanuskript. Universität Rostock, Rostock
-

-
- [69] Kaltofen, F. (1978): Anwendung der rechnerunterstützten Konstruktionsoptimierung zur optimalen Anordnung der Längsbauteile im Hauptspantquerschnitt eines Massengutschiffes. Dissertation, Universität Rostock, Rostock
- [70] Knothe, K.; Wessels, H. (2008): Finite Elemente. Eine Einführung für Ingenieure. Berlin [u.a.], Springer, 4. Aufl.
- [71] Kober, M. (2011): Ein Beitrag zur strukturellen Optimierung realer Bauteile in metallischer und Faserverbundbauweise unter Verwendung von wirkebenenbasierten Bruchkriterien. Berlin, mbv, 1. Aufl.
- [72] Kolukula, S.S. (2011): The Plain Stress Problem. <http://in.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/32519-stress-recovery/>, MATLAB Central File Exchange
- [73] Kosaka, I. (2010): Improvement of energy absorption for the side member using topology optimization. In 11th International LS-DYNA Users Conference. S.25-30
- [74] Krog, L.; Grihon, S.; Marasco, A. (2009): Smart Design of Structures through Topology Optimization. In: Eight world congress on structural and multidisciplinary optimization. WCSMO-8 ; 1-5 June 2009, Lisboa, Portugal, Lisboa, ISSMO
- [75] Krog, L., Tucker, A., & Rollema, G. (2002): Application of topology, sizing and shape optimization methods to optimal design of aircraft components. In Proc. 3rd Altair UK HyperWorks Users Conference.
- [76] Krüger, S.: Einfluß moderner Entwurfsmethoden auf die Produktentwicklung einer Werft. In: Jahrbuch der Schiffbautechnischen Gesellschaft, S. 136–40
- [77] Kuhn, H.; Tucker A.W (Hg.) (1951): Nonlinear Programming. Proceedings of the Second Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability. Berkeley and Los Angeles, S.481-492
- [78] Lamb, T. (2003-2004): Ship design and construction. Jersey City, NJ, Society of Naval Architects and Marine Engineers, [New ed.].
- [79] Lamb, T., Ramoo, R., Parthasarathy, M., & Santini, J. (2010): A New Tank Containment System to Floating LNG and CNG Processing and Storage Offshore Platforms. In Offshore Technology Conference. Offshore Technology Conference, London
- [80] Lee, H.-A.; Park, G.-J. (2012): Topology Optimization for Structures With Nonlinear Behavior Using the Equivalent Static Loads Method. Journal of Mechanical Design 134(3), S. 310-314
- [81] Lehmann, E. (2004): Schiffbautechnische Forschung in Deutschland. Schiffstechnische Konstruktionen und Berechnungen. Hamburg, Seehafen-Verlag
-

-
- [82] Lipka, A. (2007): Verbesserter Materialeinsatz innovativer Werkstoffe durch die Topologieoptimierung. Dissertation, Universität Stuttgart, Stuttgart
- [83] Liu, Z.; Korvink, J.; Huang, R. (2005): Structure topology optimization: fully coupled level set method via FEMLAB. *Structural and Multidisciplinary Optimization* 29(6), S. 407–17
- [84] Ma, Z.-D.; Wang, H.; Kikuchi, N.; Pierre, C.; Raju, B. (2006): Experimental validation and prototyping of optimum designs obtained from topology optimization. *Structural and Multidisciplinary Optimization* 31(5), S. 333–343
- [85] Marti, K.; Gröger, D. (op. 2006): Stochastische Strukturoptimierung von Stab- und Balkentragwerken. Berlin [etc.], Springer, 1. Aufl.
- [86] Mattheck, C. (1998): Design in nature. Learning from trees. Berlin ;, New York, Springer-Verlag
- [87] Mattheck, C. (2007): Secret design rules of nature. Überw. Ill. Karlsruhe, Forschungszentrum Karlsruhe, 1. Aufl.
- [88] MathWorks, Inc. (2013): Matlab R2013a Matlab Help. Mathworks, Inc.
- [89] Maute, K. (1998): Topologie- und Formoptimierung von dünnwandigen Tragwerken. Stuttgart, Universität Stuttgart, Stuttgart
- [90] Meier-Peter, H.; Bernhardt, F.; Ackermann, G. (2006): Handbuch Schiffsbetriebstechnik. Betrieb, Überwachung, Instandhaltung. Hamburg, Seehafen Verl, 1. Aufl.
- [91] Meiss, K. U. (2007): Anwendung von Strukturoptimierungsmethoden auf den Entwurf mehrfeldriger Schrägseilbrücken und Extradosed Bridges. Beuren ;, Stuttgart, Grauer
- [92] Meschke, G.; Kuhl, D. (2. Auflage 2002): Grundlagen der Finite Elemente Methode. Vorlesungsmanuskript der Ruhr-Universität Bochum. Bochum
- [93] Michell, A. (1904): The Limits of Economy of Material in Frame-Structures. *Philosophical Magazine*(Series 6 .V8), S. 589–97
- [94] Müller, G. (2007): FEM für Praktiker. Renningen-Malmsheim, expert-Verlag, 8. Aufl.
- [95] Nguyen, T.; Paulino, G.; Song, J.; Le, C. (2010): A computational paradigm for multiresolution topology optimization (MTOP). *Structural and Multidisciplinary Optimization* 41(4), S. 525-539
- [96] Okumoto, Y.; Mano, M.; Okada, T.; Takeda, Y. (2009): Design of Ship Hull Structures. A Practical Guide for Engineers. Berlin, Heidelberg, Springer
-

-
- [97] Olbrich, M. (2005): Strukturoptimierung von Gelenklagergehäusen unter Berücksichtigung des Lagerlaufverhaltens. Göttingen, Cuvillier, 1. Aufl.
- [98] Ole Sigmund; Allan Gersborg-Hansen; R. Haber (2003): Topology optimization for multiphysics problems: A future FEMLAB application? In: Nordic Matlab Conference NMC2003, COMSOL A/S, S. 237–242
- [99] Olhoff, N. (1993): Computer aided optimum design of structures. Lecture notes; COMETT course, 23 - 26 August 1993. Ålborg
- [100] Pahl, G.; Beitz, W.; Feldhusen, J.; Grote, K.-H. (2007): Konstruktionslehre. Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung Methoden und Anwendung. Berlin ;, Heidelberg, Springer, 7. Aufl.
- [101] Papula, L. (2001): Mathematische Formelsammlung für Ingenieure und Naturwissenschaftler. Braunschweig, Wiesbaden. Vieweg, 7. Aufl.
- [102] Parvizian, J.; Düster, A.; Rank, E. (2012): Topology optimization using the finite cell method. Optimization and Engineering 13(1), S. 57-78
- [103] Pentschew, P. (1976): Analytische Dimensionierung der Verbände im Hauptspantquerschnitt von Schiffen unter Einbeziehung nichtlinearer Optimierungsmethoden. Dissertation, Universität Rostock, Rostock
- [104] Persson, P.-O. (2004): Mesh Generation for Implicit Geometries. Ph.D. thesis, MIT California, Berkeley
- [105] Raasch, I. (1998): Usage of Optimization Tools in the Design Process at BMW. In: MSC User Conference, Los Angeles
- [106] Rademacher, H.; Toeplitz, O. (2001): Von Zahlen und Figuren. Proben mathematischen Denkens für Liebhaber der Mathematik. Berlin [u.a.], Springer, Reprint der 2. Aufl. Berlin, Springer, 1933.
- [107] Ramm, E.; Maute, K.; Schwarz, S. (1998): Conceptual design by structural optimization. Rotterdam, A. A. Balkema Uitgevers Bv.
- [108] Riedel, J. (2000): Gewichtsoptimierung eines Kreuzfahrtschiffes unter Spannungsrestriktionen. Institutskolloquium 2000, Bauhaus-Universität Weimar
- [109] Rigo, P. A. (2001): Optimization of Stiffened Structures & Application to Preliminary Ship Design, University of Michigan. <http://hdl.handle.net/2027.42/91701>, Zugriff am 10.03.2015
- [110] Rigo, P.; Caprace, J.-D.: Least cost optimization of large passenger vessels. In: Ships and Offshore Structures, 2(4), S.339-345
-

-
- [111] Rigo, P.; Caprace, J.-D. (2001): Optimization of Stiffened Structures & Application to Preliminary Ship Design. In: Marine technology and engineering. Boca Raton, University of Michigan; CRC Press
- [112] Risberg, M. (2011): Topology Optimization of Castings. Ludwigsburg, Altair HTC 2011. European HyperWorks Technology Conference
- [113] Rozvany, G. (1997): Topology optimization in structural mechanics. Wien [etc.], Springer
- [114] Rozvany, G. I. N.; Olhoff, N. (Hg.) (2000): Topology optimization of structures and composite continua. [proceedings of the NATO Advanced Research Workshop on Topology Optimization of Structures and Composite Continua, Budapest, Hungary. Dordrecht, Kluwer
- [115] Rozvany, G. I. N.; Prager, W. (1978): A new class of structural optimization problems. Optimal archgrids. Universität Stuttgart, Stuttgart
- [116] Schlüter, H.-J. (1999): Finite-Element-Methode. Vorlesungsmanuskript des Instituts für Schiffstechnik Duisburg. Duisburg
- [117] Schramm (2005): WCSMO-6. Sixth World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization, , Optimization Technology in Design – Trends, Direction, Gaps. Rio de Janeiro, Brazil
- [118] Schumacher, A. (2005): Optimierung mechanischer Strukturen. Grundlagen und industrielle Anwendungen. Berlin [u.a.], Springer
- [119] SHZ-Online: Werft hängt die Billig-Schiffbauer ab. <http://www.shz.de/nachrichten/lokales/flensburger-tageblatt/artikeldetails/article//werft-haengt-die-billig-schiffbauer-ab.html> , Zugriff am 08.05.2012
- [120] Sigmund, O., Petersson, M. (1998): Numerical instabilities in topology optimization: a survey on procedures dealing with checkerboards, mesh-dependencies and local minima. Structural and Multidisciplinary Optimization 16(1), S. 68–75
- [121] Sigmund, O. (2001): A 99 line topology optimization code written in Matlab. Structural and Multidisciplinary Optimization 21(2), S. 120–27
- [122] Siva Srinivas Kolukula (2011): The Plane Stress Problem. <http://in.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/31788> , Zugriff am 23.01.2015
- [123] Soyka, M. (2014): Licht am Ende des Tunnels. Verband für Schiffbau und Meerestechnik blickt vorsichtig optimistisch in die Zukunft. Stadt, Land, Hafen : die Zeitung rund um die Logistik(5), S. 12–13
-

-
- [124] SPIEGEL-ONLINE(2012): Kreuzfahrt: Aida ordert erstmals Schiffe in Japan - <http://www.spiegel.de/reise/aktuell/kreuzfahrt-aida-ordert-erstmals-schiffe-in-japan-a-778245.html> , Zugriff am 10.05.2012
- [125] (1989): Stahlschiffbau. Berlin, Verl. Technik, 6. Aufl.
- [126] Steinke, P. (2010): Finite-Elemente-Methode. Rechnergestützte Einführung. Berlin ;, Heidelberg, Springer-Verlag, 3. Aufl.
- [127] Svanberg, K. (1982): Advanced topics in structural optimization. PhD Thesis. Techn. Univ. of Denmark, Lungby
- [128] Svanberg, K. (1987): The method of moving asymptotes—a new method for structural optimization. International journal for numerical methods in engineering, S. 359–373
- [129] Szabó, Á. (1978): The beginnings of Greek mathematics. Dordrecht, Holland ;, Boston, U.S.A, D. Reidel Pub. Co.
- [130] Szabo, B. A.; Babuška, I. (1991): Finite element analysis. New York, Wiley
- [131] Talischi, C.; Paulino, G. H.; Pereira, A.; Menezes, I. F. M. (2012): PolyMesher: a general-purpose mesh generator for polygonal elements written in Matlab. Structural and Multidisciplinary Optimization 45(3), S. 309–328
- [132] Talischi, C.; Paulino, G. H.; Pereira, A.; Menezes, I. F. M. (2012): PolyTop: a Matlab implementation of a general topology optimization framework using unstructured polygonal finite element meshes. Structural and Multidisciplinary Optimization 45(3), S. 329–357
- [133] Tschullik, R.; Kaeding, P. (2013): Untersuchungen zur Konstruktionsverbesserung mittels struktureller Topologieoptimierung im Vorschiffbereich. In: Jahrbuch der Schiffbautechnischen Gesellschaft, S. 312–320
- [134] Tschullik, R.; Pentschew, P. (2009): Increasing Perspectives for FE-Modelling. In: Black Sea: International Conference on Marine Science and Technologies
- [135] Tschullik, R.; Pentschew, P.(2008): Integrative Wechselwirkung von numerischer Optimierung und dem schiffbaulichen Entwurfsprozess. In: Weimarer Optimierungs- und Stochastiktag. Weimar
- [136] Tschullik, R.; Prommer, H.; Kaeding, P. (2010): A Concept of Topological Optimization for Bow Structures. In: COMPIT: International Conference on Computer Applications, S. 132–39
-

- [137] Tschullik, R., Schenk, S., & Kaeding, P. (2012): Efficient Use of an API in Ship Structural Design—a Biomechanical Optimization Example. In The Twenty-second International Offshore and Polar Engineering Conference. International Society of Offshore and Polar Engineers, S. 952-957
- [138] Tschullik, R., Prommer H, Pentschew, P, Kaeding, P (2010): Design Concepts of Double Bottom Sections based on Topology Optimization, Proc 11th Symp Practical Design of Ships and Other Floating Structures, PRADS, Rio de Janeiro/Brazil, S.516-522
- [139] Venkataraman, P. (2002): Applied optimization with MATLAB programming. New York, Wiley & Sons
- [140] Verband für Schiffbau und Meerestechnik e. V (2011): VSM Jahresbericht 2011. Informationen aus der deutschen Schiffbau- und Meerestechnik-Industrie. Hamburg
- [141] Verband für Schiffbau und Meerestechnik e. V (2014): VSM Jahresbericht 2013/2014. Informationen aus der deutschen Schiffbau- und Meerestechnik-Industrie. Hamburg
- [142] Weiss, J. (2005): Strukturoptimierung auf Basis von bionischen Prinzipien. Topologieoptimierung zur Verbesserung des Schwingungsverhaltens von Bauteilen. Kaiserslautern, IVW
- [143] Werkle, H. (2008): Finite Elemente in der Baustatik. Statik und Dynamik der Stab- und Flächentragwerke ; mit 43 Tabellen. Wiesbaden, Vieweg, 3. Aufl.
- [144] Westermann, T. (2010): Modellbildung und Simulation. Mit einer Einführung in ANSYS. Modellbildung und Simulation. Berlin [u.a.], Springer-Verlag
- [145] Wohlers, W. (2005): Mehrstufige Optimierung komplexer strukturmechanischer Probleme. Göttingen, Cuvillier, 1. Aufl.
- [146] Zienkiewicz, O. C. (1975): Methode der finiten Elemente. Wien, Carl Hanser Verlag